

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Внедрение БШС на нефтегазовых месторождениях . .	10
1.1 Этапы проектирования БШС	11
1.2 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий передачи данных	14
1.2.1 Сети малого радиуса действия с низкоскоростным трафиком	14
1.2.2 Сети дальнего радиуса действия с высокоскоростным трафиком	18
1.2.3 LTE	22
1.2.4 Выбор протокола беспроводной широкополосной сети для решения задачи синтеза топологий	23
1.3 Определение параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций	25
1.3.1 Энергетический потенциал канала связи	26
1.3.2 Модель потерь в свободном пространстве	28
1.3.3 Модель распространения SUI	30
1.3.4 Модель двух лучевого распространения	31
1.3.5 Расчет параметров БС, необходимых для задачи оптимизации	32
1.4 Оценка характеристик производительности сети с помощью стохастических моделей массового обслуживания	33
1.4.1 Время передачи пакета в канале	34
1.4.2 Расчет межконцевой задержки	39
1.5 Выводы	42
Глава 2. Размещения базовых станций БШС для покрытия линейной территории	41
2.1 Актуальность внедрения БШС для телекоммуникационного покрытия линейного участка	41

2.2	Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде задачи целочисленного линейного программирования	45
2.2.1	Постановка задачи	47
2.2.2	Модель целочисленного линейного программирования . . .	47
2.3	Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме	53
2.3.1	Постановка задачи	54
2.3.2	Дерево ветвлений для перебора элементов в множестве Γ .	56
2.3.3	Метод ветвей и границ для задачи размещения БС	59
2.3.4	Построения последовательности топологий для итерационной процедуры моделирования БШС	64
2.4	Сравнительная оценка полученных моделей	65
2.5	Выводы	70
Глава 3. Размещение базовых станций БШС для обслуживания множества рассредоточенных объектов .		72
3.1	Актуальность внедрения БШС для обслуживания рассредоточенных объектов на месторождении	72
3.2	Математическая модель задачи проверки допустимого решения при заданных местах размещения станций.	73
3.2.1	Постановка задачи	74
3.2.2	Модель линейного программирования	75
3.3	Математическая модель оптимальной задачи выбора набора размещаемых станций и определения мест их размещения	81
3.3.1	Постановка задачи.	81
3.3.2	Модель частично целочисленного линейного программирования	83
3.4	Выводы	89
Заключение		91
Список сокращений и условных обозначений		93

Словарь терминов	94
Список литературы	95
Список рисунков	113
Список таблиц	114
Приложение А. Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи 2, 3 и 4	116
Приложение Б. Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде задачи целочисленного линейного программирования	118
Приложение В. Метод ветвей и границ на примере задачи размещени двух базовых станций	121
Приложение Г. Численный пример оптимального размещения базовых станций сети с линейной топологией в виде экстремальной задачи в комбинаторной форме	126

Глава 1. Внедрение БШС на нефтегазовых месторождениях

Цифровая трансформация является первостепенной задачей для развития нефтегазового комплекса. Переход производства к новой модели управления «Индустрия 4.0» позволит бизнесу сохранить лидирующие позиции и не утратить производственного потенциала [1, 2]. Неотъемлемой частью такой трансформации является внедрение беспроводных технологий [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Современные беспроводные широкополосные сети связи (БШС), обладая рядом преимуществ, нашли свое широкое применение в задачах мониторинга и управления различных производственных или гражданских объектов, технологических установок, движущихся транспортных средств и т.п. К ряду таких преимуществ можно отнести возможность получения информации с любой точки контролируемой территории, быстрый ввод в эксплуатацию, сокращение капитальных затрат на создание и эксплуатацию сети, высокая гибкость, мобильность и масштабируемость.

Нефтегазовые объекты часто расположены в труднодоступной местности на обширной территории в несколько километров. Данный фактор является ключевым преимуществом беспроводных технологий для развертывания по сравнению с кабельными коммуникациями.

Беспроводная связь в автоматизации промышленного производства способствует осуществлению производственных процессов более экономически эффективно, гибко и надежно, а также позволяет реализовывать новые концепции автоматизации [8]. Для управления большими объемами на месторождениях применение беспроводных каналов связи в режиме 60/24/7, позволяющая операторам принимать обоснованные управленческие решения, своевременно диагностировать и устранять неисправности, а также оптимизировать работу АСУ ТП в целом [9].

Не маловажную роль на месторождениях играет безопасность. Технологические объекты на нефтяных или газовых месторождениях, оснащенных широкополосным подключением, позволяют соответствовать современным концепциям и требованиям в сфере безопасности персонала и безопасности имущества, включая охрану с использованием беспроводных камер видеонаблюдения. Для предоставления доступа к объекту могут использоваться дополнительные возможности, такие как считывание номерных знаков и

распознавание лиц. А благодаря использованию тепловых камер можно контролировать риски отключения и перегрузки даже с помощью периодических снимков оборудования на промысле.

Внедрение БШС особенно хорошо подходит для систем видеонаблюдения, поскольку позволяют расположить камеры там, где они нужны, а не там, где удобно для подключения к проводной сети.

В данном исследовании в рамках цифровой трансформации «Индустрия 4.0» представлены модели и методы оптимизации при проектировании беспроводных сетей на месторождениях (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 — Задача синтеза топологии при проектировании БШС в рамках цифровой трансформации "Индустрия 4.0".

1.1 Этапы проектирования БШС

Для обеспечения высокого качества беспроводной связи необходимо проводить грамотное проектирование БШС. Существуют различные подходы к про-

ектированию беспроводных сетей. Для одних задач является максимальная зона покрытия, для других – достижения максимальной производительности передачи данных, для третьих – нахождения баланса между зоной охвата и производительностью [10]. В диссертации будут предложены модели и методы оптимального размещения базовых станций (БС) БШС, целью которых является максимальная зона охвата. Процесс проектирования современной БШС, как правило, для такого подхода имеет следующие основные этапы (Рисунок 1.2):

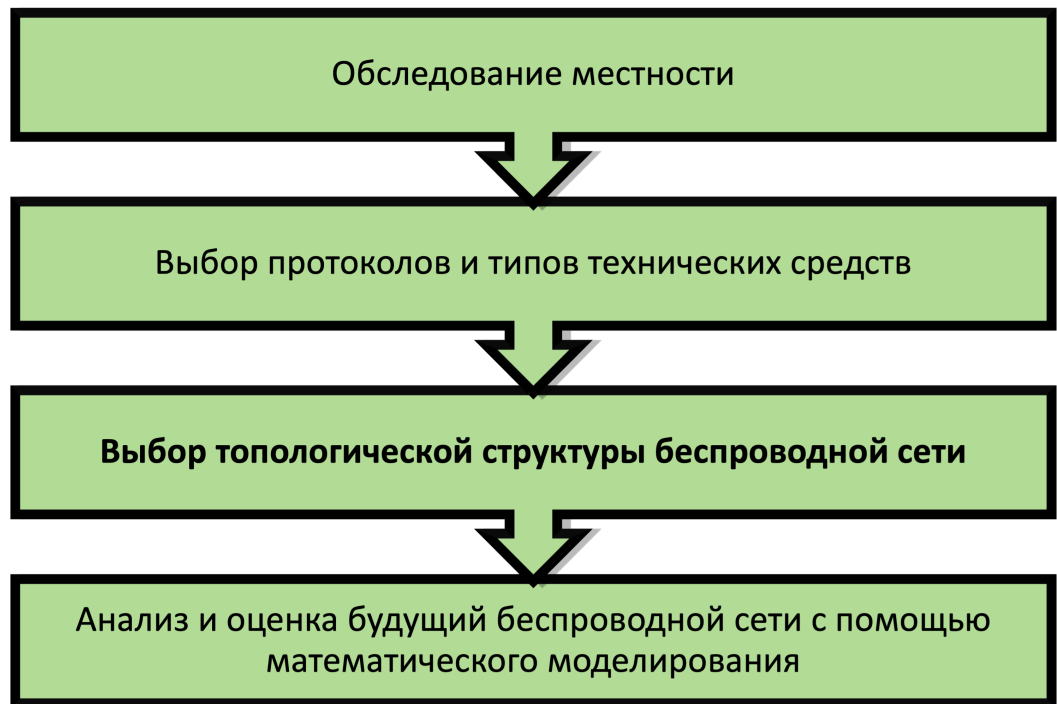


Рисунок 1.2 — Этапы проектирования БШС.

Любое проектирование БШС всегда начинается с первоначального обследования местности. В данный этап входят задачи радиобследования и радиопланирования. оценки реальных размеров области контроля, наличие стационарных инженерно-технических сооружений, мешающих передаче сигнала, такими как металлические конструкции, перекрытия, стены и т.д. При развертывании БШС в открытой местности также немаловажную роль играет наличие перепада высот. В ходе выполнения комплекса работ на местности, определяются возможные точки размещения оборудования [11]. На основе результатов данного этапа проводится выбор типов моделей оборудования для дальнейшего их размещения и организации сети.

Производительность и дальность действия беспроводных сетей не безграничны. При их проектировании стоит учитывать множество параметров: частота, скорость, мощность излучения [10]. На этапе выбора оборудования

необходимо определиться с протоколом будущей БШС и подготовить необходимый комплекс технических средств для развертывания будущей сети. БС является основополагающим устройством будущей сети, которая отвечает за покрытие заданной области. Покрытие в свою очередь зависит от мощности передатчика устройства, усиления антенн, чувствительности приемного устройства.

После определения множества возможных точек размещения БС на этапе обследования местности и выборе возможных типов и моделей оборудования можно переходить непосредственно к размещению БС и определению топологической структуры сети. Этап выбора топологической структуры будущей сети является ключевой проблемой данной диссертации. В рамках данной проблемы будут предложены модели и методы оптимального размещения БС для организации БШС.

После решения задачи синтеза топологии, для полученного размещения решаются задачи оценки характеристик производительности БШС. Для расчета оценок широко применяется аппарат теории массового обслуживания (ТМО). Примерами таких задач являются расчет надежности всех элементов сети [12, 13, 14], оценка характеристик качества канала, вероятности потери пакетов, пропускной способности, времени доставки сообщений в сети [15, 16, 17, 18, 19, 20], оценка межконцевой задержки сети [18, 19]. В работе [21] рассматривают стохастическую модель марковской цепи для оценки качества передачи данных автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) в условиях помех и прерываний. Одним из современных направлений в исследовании характеристик производительности БШС является использование ТМО в совокупности с методами машинного обучения (МО) [22, 23].

Описанная процедура проектирования БШС является общей для большинства внедрения беспроводных коммуникационных сетей. В зависимости от конкретных целей, которые преследуют проектировщики, план работ может требовать содержание конкретных этапов и подзадач проектирования. В общем же случае проектирование БШС будет происходить согласно данной последовательности этапов. В изложенной концепции важным является представление места результатов исследования данной диссертации в глобальной задаче комплексного проектирования.

1.2 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий передачи данных

- Скорее всего придется удаить инфу про сенсорные сети;

Анализ современных беспроводных сетей.

- Wi-Fi
- LTE
- 5G
- Wi-Max

Сети VANET

- 802.11p;
- решения на основе сотовых сетей.

Существуют множество различных протоколов БШС, используемых на месторождении. Любая сеть имеет свои преимущества для конкретной задачи. Исходя из специфики таких задач, можно выделить два больших класса. Первый класс – это сети, узлами которого являются измерительные устройства (сенсоры) АСУ ТП. Такие сети называют ячеистые сенсорные сети. Для таких сетей характерны низкоскоростной трафик, малое энергопотребление, высокие требования к надежности передачи, а также надежности, непосредственно, оборудования. Вторым классом сетей являются БШС, для которых характерны высокая скорость передачи, большая дальность передачи сигнала от несколько десятков метров до несколько сотен метров. Примерами таких сетей являются сети второго уровня, объединяющие кластеры сенсорных сетей для передачи данных в центр управления. Также примером является БШС сбора мультимедийного трафика с беспроводных камер видеонаблюдения.

1.2.1 Сети малого радиуса действия с низкоскоростным трафиком

Нижний уровень АСУ ТП, включающий измерительные приборы технологических параметров, исполнительные механизмы, коммутируемые с устройствами сопряжения, объединяются в беспроводную сенсорную сеть

для эффективного мониторинга, контроля и управления технологическим объектом [24].

Ячеистая сеть (Mesh) является одной из эффективных технологий, позволяющая работать в неблагоприятных климатических условиях [25, 26]. Ячеистые сети имеют повышенную надежность благодаря тому, что каждое устройство является узлом такой сети, через который помимо сигнала с самого устройства передается сигнал смежных узлов сети. Сеть на основе ячеистой топологии надежна, энергоэффективна. Высокая надежность обеспечивается наличием резервных маршрутов передачи данных. При прекращении функционирования одного из устройств (датчиков), передача сигнала будет происходить в обход устройства, по резервному пути. Ключевым недостатком MESH сетей является – низкая скорость передачи данных. К ключевым преимуществам сенсорных сетей можно также отнести автономность питания, позволяющее установку узлов (устройств) сети на удалении от проводных сетей и общего питания.

Благодаря невысокому энергопотреблению устройств ячеистые сенсорные сети могут работать продолжительное время от одного элемента питания. Это осуществляется за счет управления временем опроса данных в диапазоне от одной секунды до одного часа. Такой подход позволяет экономить заряд батареи устройства и увеличивает продолжительность жизни устройства.

Широкое распространение в промышленности получили протоколы сенсорных сетей: ISA100.11a, ZigBee, WirelessHART и набирающий свою популярность стандарт LoRaWAN. Производители сенсорных сетей Emerson, Honeywell, Yokagawa, Simens и др. обеспечивают высокую надежность узлов таких сетей, так как работа оборудования осуществляется в условиях пыли, влаги, вибраций и высоких температур.

ISA 100.11a

Данный протокол является одним из распространенных протоколов передачи сигнала на промысле. Так компания Honeywell Process Solutions приняла решение разрабатывать оборудование, совместимое с ISA 100 Wireless [25]. Топология, используемая в ISA 100.11a, основана на соединении типа "точка –

точка". Такая сеть представляет собой централизованную систему, где каждое полевое устройство связано непосредственно с главным устройством (шлюзом).

Протокол ISA 100.11a определяют следующие методы: расширенный спектр со скачкообразной перестройкой частоты (FHSS), множественный доступ с временным разделением каналов (TDMA) и множественный доступ с контролем несущей (CSMA).

Как и любая MESH сеть, данная технология энергоэффективной, т.е. с меньшим энергопотреблением для мощности передачи сигнала. Данный фактор вносит существенную проблему, каждое устройство должно быть в непосредственной близости от шлюза и иметь прямую видимость для передачи данных. Для решения этой проблемы, в стандарт была добавлена поддержка Mesh. Потеря связи и плохой сигнал сказываются не только на целостности и своевременности получаемой информации, но и на жизненном цикле батареи питания [26].

ZigBee

Технология Zigbee основана на протоколе IEEE 802.15.4 LR PAN (Low Rate Personal Area Network) для низкоскоростных сетей с малым энергопотреблением. Этот стандарт описывает физический и канальный уровни со скоростью обмена данными до 250 Кбит/с и вариантами топологии "звезда", "точка-точка" и Mesh. Частотный диапазон сети для России 2400 - 2483 МГц (16 каналов). Дальность связи – 200 м. Стандарт поддерживает до 255 одновременно подключенных устройств. Ключевым преимуществом ZigBee является низкое энергопотребление. Исторически технологии ZigBee развивались не в направлении повышения скорости передачи данных, а по пути улучшения алгоритмов сетевого взаимодействия для обеспечения длительного времени работы без замены электропитания. В сетях ZigBee различают два типа устройств – полнофункциональные устройства FFD (Full-Function Device) и устройства с сокращенным набором функций RFD (Reduced-function Device). Устройство FFD выступает в роли координатора, то есть организующего сеть и ретранслирующего сообщения. Устройства RFD не могут обмениваться данными друг с другом, а только через координатор FFD.

Сеть ZigBee строится на базе трех основных устройств: координатор, оконечное устройство и маршрутизатор. Координатор выполняет основную роль в сети: формирует, запускает сеть, участвует в построении сети, управляет ею, выполняет функции маршрутизатора и доверительного центра (trust-центра) – устанавливает настройки безопасности, задает настройки в процессе присоединения устройств к сети, управляет ключами безопасности [3].

WirelessHART

Протокол WirelessHART разработан для мониторинга на базе проводного протокола HART с выходным сигналом 4 – 20 мА. Верхний стек WirelessHART соответствует верхним уровням HART и Modbus. Первой компанией, которая предоставила оборудование, поддерживающее WirelessHART была Emerson. Технология также, как и ZigBee, соответствует стандарту IEEE 802.15.4, работающая в частотах не лицензируемого диапазона ISM (промышленность, наука и медицина) — 2400–2483,5 МГц.

Координация коммуникации в сети с одноуровневым кодированием осуществляется посредством метода множественного доступа с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access – TDMA), который синхронизирует радиостанции с периодом 10 мс [27]. Шлюз системы WirelessHART поддерживает до 250 полевых устройств.

В WirelessHART используется широкополосная модуляция методом прямой последовательности DSSS. Для предотвращения интерференции с сетями, работающими на этой же частоте, предусмотрена технология скачкообразной смены несущей частоты (FHSS) [26]

LoRaWAN

LoRaWAN – современный стандарт интернета вещей (IoT) с большим потенциалом. Применяется для передачи низкоскоростного трафика. Данная технология только начала осваивать промышленный сектор. К преимуществам

LoRaWAN относят очень высокую чувствительность приемника до -148 дБм, большая дальность связи 10-15 км и низкое энергопотребление у конечных устройств. По сравнению с другими энергоэффективными сетями LoRaWan имеет колоссальную дальность коммуникационной связи. Демодулятор LoRa может работать при входном сигнале, ниже уровня собственных шумов, вплоть до -20 дБ [28].

Низкое энергопотребление осуществляется за счет передачу небольших пакетов данных. Это в свою очередь приводит к относительно низкой пропускной способности. Скорость передачи в зависимости от используемой технологии передачи данных на физическом уровне варьируется от нескольких сотен бит/с до нескольких десятков Кбит/с.

1.2.2 Сети дальнего радиуса действия с высокоскоростным трафиком

Ячеистые сенсорные сети давно и прочно вошли как неотъемлемая часть АСУ ТП на производстве. Тем не менее они имеют один существенный недостаток – малый радиус действия связи. Для решения такой проблемы, кластеры ячеистых сетей объединяет между собой в иерархическую структуру, в которой шлюзы объединяются в сети, на базе протоколов дальнего радиуса действия: Wi-Fi, WiMAX [29]. Такие технологии организуют второй уровень, после уровня сбора и обработки информации с полевых устройств, для передачи данных в центр управления. Еще одним современным направлением является внедрение сетей телекоммуникаций для обеспечения связи для мобильных устройств обходчиков и сбора данных с беспроводных камер видеонаблюдения [25].

WiMAX

Технология WiMAX основана на стандарте IEEE 802.16. Разработанный стандарт беспроводной широкополосного доступа рассчитан на внедрение в городских распределенных региональных беспроводных сетях в диапазонах до

66 ГГц. Стандарт предусматривает 5 режимов работ. Режим магистральной передачи WirelessMAN-SC работает в диапазоне 10-66 ГГц со скоростями до 120 Мбит/с и шириной канала порядка 25 МГц. Применяемые топологии – "точка-точка" и "точка - много точек" [30]. Остальные режимы WirelessMAN-SCa, WirelessMAN-OFDM, WirelessMAN-OFDMA и WirelessHUMAN работают на частотах 2-11 ГГц. Режим WirelessMAN-OFDM поддерживает архитектуру Mesh. Дальность связи для WiMAX технологии достигает 20 км для прямой видимости и хорошего состояния радиоканала.

На сегодня технология применяется в качестве организации резервированного канала связи для сбора данных с кустовых площадок с блока местной автоматики в диспетчерский пункт и мультимедийного трафика с систем видеонаблюдения.

Технология WiMAX успела получить свою популярность на месторождениях и занять свою нишу в организации телекоммуникационной связи. Исторически WiMAX всегда рассматривался как альтернатива сотовым сетям связи. С резким скачком популярности LTE и появлением сетей пятого поколения WiMAX давно уже является не конкурентным стандартом на рынке.

Wi-Fi

Семейство протоколов IEEE 802.11 или Wi-Fi является одним из популярных протоколов среди беспроводных сетей широкополосного доступа. Широкое применение Wi-Fi не могло не отразиться и на нефтегазовом секторе [31, 32, 33, 34].

Стандарт определяет два типа топологий. Первая топология в стандарте называется независимой (Independent Basic Service Set, IBSS) на основе "точка-точка". Такую сеть также называют Ad-Нос сетью. Передача в сети производится на основе децентрализованного алгоритма доступа. Хотя и не существует главной базовой станции, в сети Ad-Нос в каждый момент времени любой узел может взять ведущую роль базовой станции. Следующий тип – централизованная топология. Такой тип сети называют Infrastructure Basic Service Set или просто BSS [35]. Узлы сети могут обмениваться только с базовой станцией, обеспечивающее взаимодействие между всеми конечными узлами сети.

Стек протоколов стандарта IEEE 802.11 соответствует общей структуре 802 (Рисунок 1.3). Физический уровень практически соответствует физическому уровню в модели OSI. Канальный уровень во всех протоколах 802.x разбит на два или более подуровня. Подуровень управления доступом к среде обеспечивает адресацию и механизмы управления доступом к каналам. Подуровень MAC выступает в качестве интерфейса между физическим уровнем и подуровнем управления логическим соединением (LLC). Задача LLC состоит в том, чтобы сделать различия стандартов 802.11x невидимыми для сетевого уровня [36]. На уровне MAC протокола 802.11 определяются два типа доступа к среде передачи данных: функция распределенной координации (Distributed Coordination Function, DCF) и функция централизованной координации (Point Coordination function, PCF), работающий только в режиме IBSS [37].

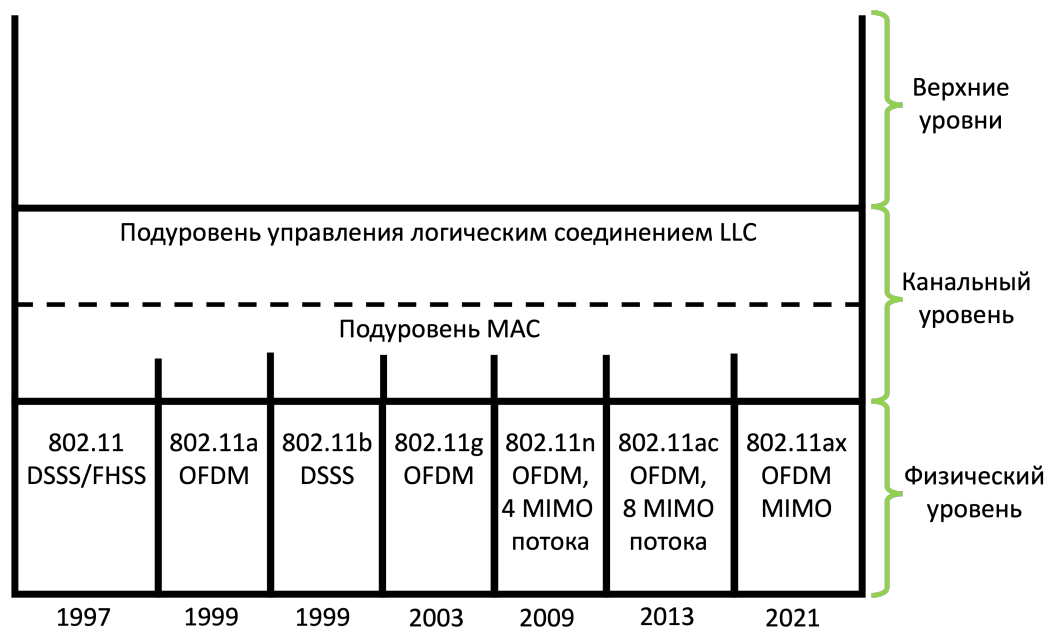


Рисунок 1.3 — Часть стека протоколов 802.11

Развитие стандарта. Первый стандарт в 1997 году поддерживал скорость передачи до 1,2 Мбит/с с рабочем диапазоном частот 2,4 ГГц. Уже в 1999 году стандарт 802.1b скорость передачи достигала 11 Мбит/с. В тот же 1999 год одновременно вышел 802.11a, поддерживающий способ модуляции OFDM – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов. Данный метод модуляции пришел на смену методов прямой последовательности для расширения спектра (direct sequence spread spectrum, DSSS) и псевдослучайная перестройка рабочей частоты (frequency-hopping spread spectrum, FHSS). Протокол работает в диапазоне частот 5ГГц. Данное введение позволило увеличить

скорость до 54 Мбит/с. В 2003 году появился 802.11g, в котором OFDM стал совместим с 802.11b DSSS. В 2009 году, в рамках стандарта 802.11n была завершена работа над методами передачи данных SU-MIMO (Single User – Multiple Input Multiple Output), которые одновременно используют несколько антенн на приемнике и передатчике, что дает очередной выигрыш в скорости. Благодаря четырем антеннам и более широким каналам стандарт 802.11 теперь определяет скорости до 600 Мбит/с [36, 38]. В 2013 году появился стандарт 802.11ac с максимальной теоретической скоростью беспроводного соединения 3,47 Гбит/с. В данном стандарте представлена технология одновременная передача по нескольким антеннам сразу четырем клиентам MU-MIMO (Multi User — Multiple Input Multiple Output). В 2021 была представлена сеть шестого поколения Wi-Fi 6, стандарт получил название IEEE 802.11ax. Скорость передачи достигает 9608 Мбит/с. Стандарт работает на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц. Реализована новый тип модуляции – 1024-QAM. Теперь MU-MIMO работает для одновременной передачи до восьми клиентам. Кроме того, Wi-Fi 6 обеспечивает эффективную работу в сетях IoT, существенно повышая эффективность работы с малыми объемами данных и эффективно используя батарею маломощных измерительных устройств за счет сокращения обмена служебной информацией.

Беспроводной широкополосный доступ вдоль протяженных автомобильных дорог. Обеспечение безопасности на автодорогах, в том числе на промысле, является актуальной задачей на сегодняшний день. Одним из методов ее решений является создание современной инфраструктуры передачи мультимедийной информации вдоль протяженных автомагистралей [39]. Для реализации такой сети разработан стандарт IEEE 802.11p/WAVE. Протокол разработан для обмена данными между высокоскоростными транспортными средствами, а также между транспортными средствами и придорожной инфраструктурой. Такие сети называются V2X (Vehicle-to-everything). 802.11p работает в диапазоне 5,85–5,925 ГГц для движущихся объектов на скорости до 200 км/ч мимо неподвижных базовых станций на расстоянии до 1 км. Протокол IEEE 802.11p входит в состав стандарта Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) и является своего рода интерфейсом для связи с IEEE 1609. В совокупности два этих стандарта определяют интерфейс и набор дополнительных функций для обеспечения связи между движущимися объектами [40].

Ячеистая топология стандарта 802.11. Стандарт поддерживает MESH топологию. Все нововведения относятся к MAC уровню и рассматриваются вопросы маршрутизации пакетов в рамках mesh-сети. Фактически в стандарте рассматриваются сетевой и транспортный уровень модели OSI. Пакет уровня MAC содержит дополнительный MESH - заголовок в отличие от стандартных заголовка пакетов 802.11. В заголовке указывается время жизни пакеты при пересылке через несколько узлов сети [30]. Такой подход помогает решить проблему наличия циклов при выборе пути передачи. Протоколы маршрутизации делят на два класса: проактивный – каждый узел строит свою таблицу маршрутизации и делится информацией об изменении топологии сети со своими соседями и реактивный – таблицы маршрутизации не строятся, маршрут составляется по мере необходимости. Стандарт 802.11s определяет гибридный протокол маршрутизации по умолчанию – HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). Также стандарт позволяет разработчикам оборудования использовать альтернативные методы маршрутизации. Режим энергосбережения в 802.11s является опциональным [37]. Точки доступа MESH-сети (MESH Access Point, MAP) всегда активны, так как в любой момент времени могут обратиться устройства, не поддерживающие непосредственно 802.11s. Необходимость возникает в случае IoT, когда всегда устройства имеют автономное питание (измерительные устройства, датчики) [30].

При внедрении беспроводных технологий необходимо учитывать специфику выполняемых задач будущей сети. Для каждого конкретной цели существуют свои требования к скорости передачи данных, дальности связи, потребляемой мощности, помехозащищённости, надёжности и т.д. Чтобы учесть специфику данных задач разработано множество беспроводных решений, охватывающее дальность связи от несколько сантиметров до десятков километров и скоростей передачи от единиц Кбит/с до сотен Мбит/с.

1.2.3 LTE

Сеть LTE (Long-Term Evolution) состоит из двух компонентов:

- сети радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network);

– архитектура ядра сети SAE (System Architecture Evolution)

Сеть радиодоступа E-UTRAN состоит из базовых станций сети eNodeB (или eNB, evolved Node B). Интерфейс X2 позволяет соединить узлы eNodeB по принципу «каждый с каждым» для переключения устройств между базовыми станциями.

Основным компонентом архитектуры SAE является Evolved Packet Core (EPC), в состав которого входят следующие логические элементы [41]:

1. MME (Mobility Management Entity) – узел управления мобильностью абонентского терминала, взаимодействует с базовыми станциями с помощью протоколов плоскости управления C-plane.
2. UPE (User Plane Entity) – выполняет сжатие заголовков IP-протоколов, шифрование потоков данных, терминацию пакетов данных плоскости пользователя, коммутацию пакетов данных при обеспечении мобильности пользователя. Передача данных пользователей происходит согласно протоколам плоскости пользователя U-plane, взаимодействие с eNode происходит с помощью интерфейса S1-U.

Архитектура сети LTE представлена на рисунке 1.4. Интерфейс S1 необходим для соединения базовой станции eNodeB с узлами MME/UPE.

LTE в России работает на частотах в диапазоне 800, 1800 и 2600 МГц. В нижних диапазонах, где всё отлично с покрытием, проблема найти полосу достаточной для полноценного LTE ширины. В верхних обычно хорошо с частотным ресурсом, но площадь покрытия в 5-6 раз меньше при прочих равных.

1.2.4 Выбор протокола беспроводной широкополосной сети для решения задачи синтеза топологий

Задача размещения узлов БШС для ячеистых сенсорных сетей не актуально, так как ее узлами являются измерительные приборы. Выбор мест их размещения осуществляется на основе конкретного технологического процесса, который осуществляется на объекте. В силу малых дальностей связей, также неактуально говорить о выборе мест размещений точек доступа (шлюзов) сенсорных сетей. На практике, точки доступа размещаются по месту в блок-боксе местной автоматики. Целесообразно решать задачу для сетей дальнего ради-

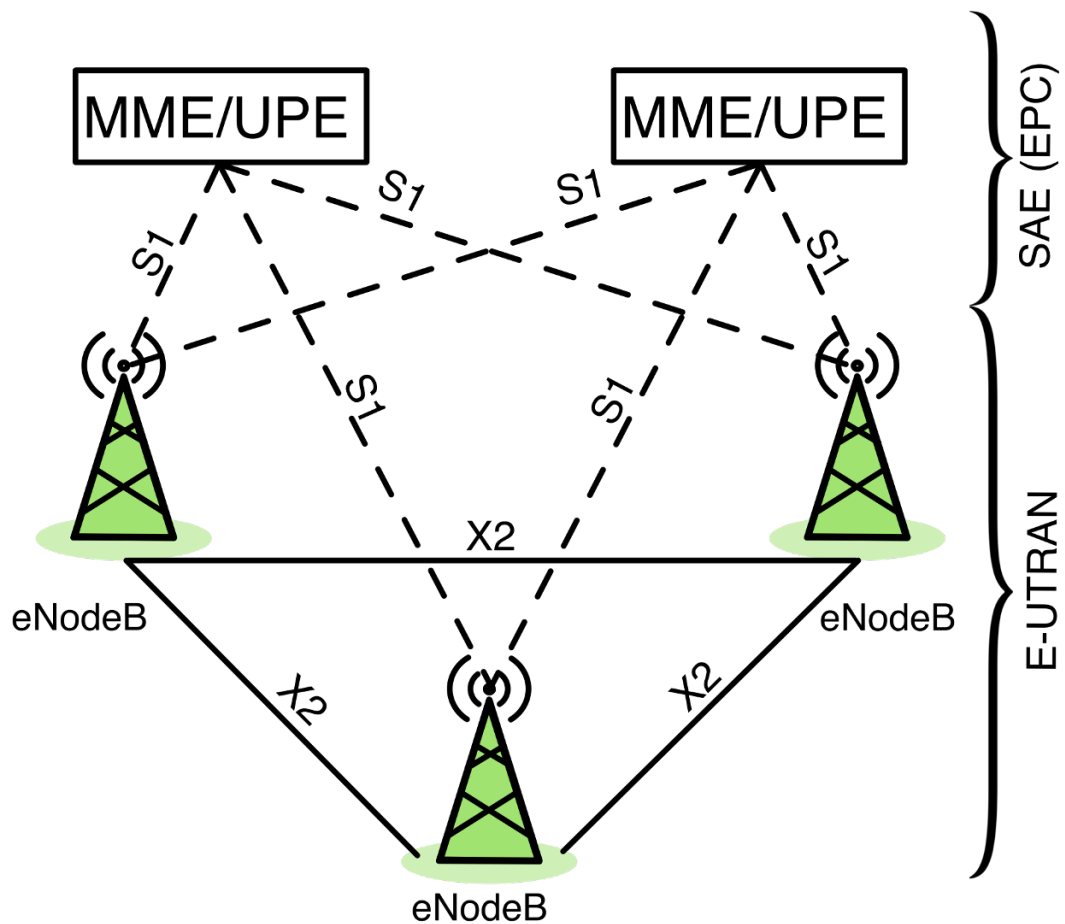


Рисунок 1.4 — Энергетический потенциал линии связи.

уса связи. В силу глобальной цифровизации месторождения, растет спрос на внедрения новых сетей, осуществляющих надежную и эффективную передачу высокоскоростного трафика. К их числу относятся не только технологические данные с объектов, но и данные с мобильных переносных устройств, камер видеонаблюдения и т.д.. На сегодняшний день хоть WiMAX широко распространен в нефтегазовой промышленности, к сожалению сам стандарт утратил свои лидерские позиции. С ростом популярности сотовых сетей LTE и 5G, WiMAX потерял все свои преимущества. Еще одна причина падения популярности – развитие Wi-Fi. Ведущие вендеры не стремятся развивать технологию, а значит и сам стандарт не будет эволюционировать в ближайшее время.

Для решения синтеза топологии решено использовать семейство протоколов IEEE 802.11. Исходя из вышеизложенного анализа, стандарт может поддерживать работу сетей внутри помещений (Indoor), на открытой местности (Outdoor). Позволяет организовать связь между движущимися объектами, и объединять узлы в самоорганизующие Mesh сети. В совокупности все эти

аспекты позволяет сделать вывод о целесообразности выбора Wi-Fi для организации телекоммуникационной связи на месторождении.

1.3 Определение параметров БШС, необходимых для решения задач размещения базовых станций

удалить это

- добавить модель Окамура-Хата
- добавить еще модели, характерные для сотовых сетей.

Этап выбора топологической структуры беспроводной сети состоит из решения задач оптимального размещения БС. В дальнейшем для решения данных задач необходимо будет ввести параметры БС: радиус связи – максимальная теоретическая дальность связи базовой станции с соседней станцией, удовлетворяющей требуемому качеству передачи сигнала; и радиус покрытия – максимальный теоретический радиус зоны покрытия БС для связи с устройствами. Данные параметры рассчитываются исходя из конфигурации БС. Далее будет представлен метод расчета. Все технические характеристики для расчета берутся из технического паспорта БС.

В БШС в большинстве случаев используются радиоволны сантиметрового диапазона. Отличительной чертой распространения данных радиоволн является почти полное отсутствие явления дифракции и прямолинейность распространения. Волны практически не огибают преград при распространении, поэтому существенное влияние оказывают рельеф местности, преграды и погодные условия.

Для расчета дальности действия связи используют модели распространения радиосигнала [42, 43, 44, 45]. Существуют различные модели, которые можно объединить в три основные категории [46]:

- теоретические модели. Данные модели обычно основана на физическом предположении об идеальных условиях;
- эмпирические модели. Это наборы уравнений, разработанные на основе различных данных полевых измерений. Одним из основных недостатков таких моделей является то, что они не могут использоваться для

- различных ситуации без изменений, поскольку они точны только для случая с теми же характеристиками, в которых проводились измерения;
- детерминированные модели. Модели очень сложны, поскольку они требуют детального знания местоположения, размеров и физических параметров всех препятствий в данной области. Такое детальное исследование может приводить к чрезмерным накладным расходам, которые в большинстве случаев могут быть лишними.

1.3.1 Энергетический потенциал канала связи

Для оценки производительности канала связи используется уравнение энергетического потенциала, который учитывает все усиления и потери уровня сигнала при его распространении от передатчика к приемнику через беспроводную среду передачи, кабели, разъемы, различные препятствия (Рисунок 1.5) [10].

В определении энергетического потенциала беспроводной линии связи участвуют следующие параметры:

- эффективная изотропно-излучаемая мощность передатчика (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP), являющаяся суммой выходной мощности передатчика и коэффициента усиления антенны за вычетом потерь в антенном кабеле разъемах передающего тракта;
- потери при распространении в свободном пространстве;
- чувствительность приемника, потери в антенном кабеле и коэффициент усиления антенны приемника.

Полное уравнение можно записать следующим образом:

$$P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} - L_{fs} + G_{recv} - L_{recv} = SOM + P_{recv}, \quad (1.1)$$

где:

- P_{tr} – мощность передатчика, дБм;
- L_{tr} – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах передающего тракта, дБ;
- G_{tr} – усиление антенны передатчика, дБ;
- L_{fs} – потери в свободном пространстве, дБ;

- G_{recv} – усиление антенны приемника, дБ;
- L_{recv} – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах приемного тракта, дБ;
- P_{recv} – чувствительность приемника, дБм;
- SOM – запас на замирание сигнала, дБ.

Энергетический потенциал указывает на качество канала передачи радиосигналов.

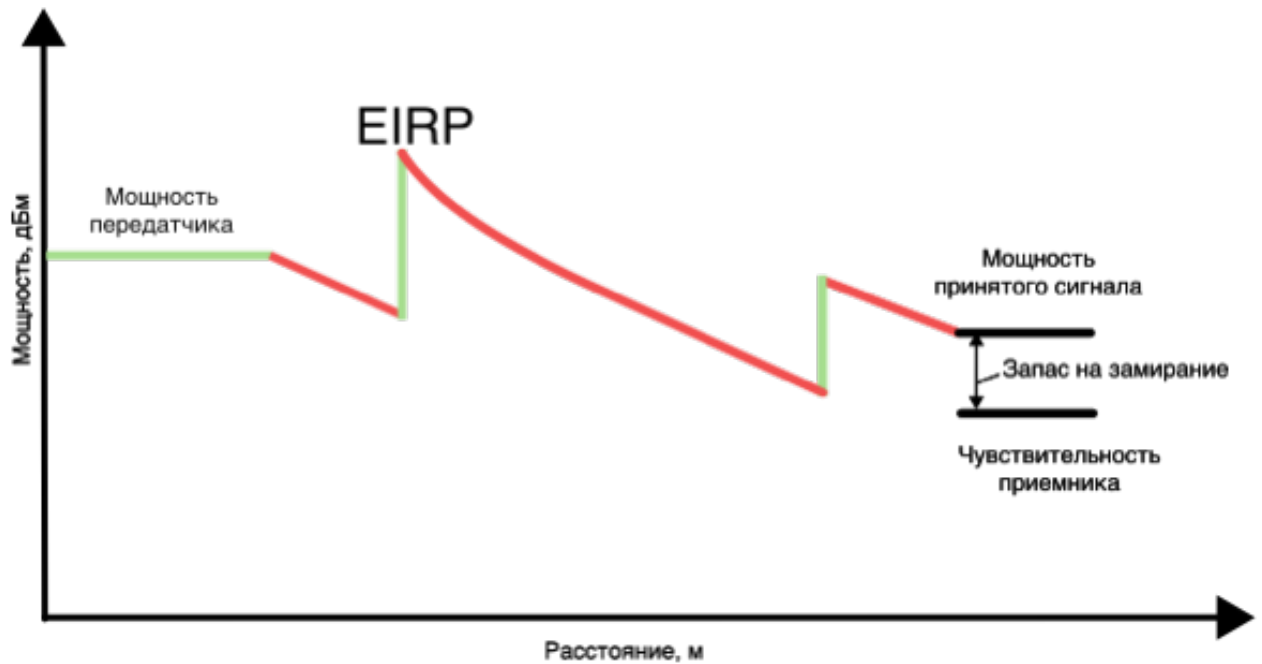


Рисунок 1.5 — Энергетический потенциал линии связи.

На стороне передатчика выходной мощностью является величина, равная мощности, подводимой к антенне. Данная величина из паспортной документации устройства имеет различные значения в зависимости от каждого поддерживаемого оборудованием стандарта и конкретных скоростей. В реальных условиях значения мощностей, как правило могут незначительно отклоняться от паспортных значений. Предельная мощность передатчика определяется государственными органами. Для примера, для БШС семейства протоколов IEEE 802.11 не превышает 100 мВт или, выражая в децибеллах, не более 20 дБм [47].

Затухание сигнала могут происходить в кабелях антенны, зависящие от типа кабеля и рабочей частоты. При подключении антенны желательно обходиться минимальной длиной кабеля. Потери сигнала в антенном кабеле

принимают 0, 1...2 дБ/м. В технической документации в потерях кабеля также учтена величина затухания в кабельных разъемах.

Усиление антенны описывает фокусирование переданного или полученного сигнала. Значения даны относительно полуволнового диполя или теоретического изотропного излучателя [8].

К потерям при распространении относятся все виды затухания сигнала, которые имеют место при его распространении от антенны передатчика к антенне приемника. Самая простая оценка потерь в свободном пространстве получается, если предположить, что сигналы передаются во всех направлениях, то есть мощность излучается одинаково во всех направлениях, и в зоне передачи или вокруг нее нет препятствий, которые могли бы повлиять на распространение электромагнитных сигналов [48].

Существуют большое количество моделей распространения. Каждая имеет свои плюсы и минусы. В зависимости от конкретных задач при проектировании возможно использовать наиболее подходящую. Ниже будут представлены модели распространения, широко используемые для сетей IEEE 802.11.

1.3.2 Модель потерь в свободном пространстве

При распространении сигнала от передатчика к приемнику часть сигнала рассеивается, по этой причине мощность на приемной стороне будет уменьшаться с увеличением расстояния от передающей антенны. Данное затухание сигнала называют потерями в свободном пространстве (Free Space Path Loss, *FSPL*).

Потери при распространении между двумя неизотропными антеннами в свободном пространстве (в воздухе) можно выразить из уравнения Фрииса (1.2):

Мощность принимаемой антенны рассчитывается из уравнения передачи Фрииса:

$$\frac{P_{recv}}{P_{tr}} = G_{tr} G_{recv} \left(\frac{c}{4\pi R f} \right)^2, \quad (1.2)$$

где c – скорость света, f – частота, R расстояние между приемной и передающей антенной.

$$L_{fs} = 20 \lg F + 20 \lg R - G_{tr} - G_{recv} + K, \quad (1.3)$$

где F – центральная частота, на котором работает канал связи, R – расстояние между приемной и передающей антенной и K – константа.

Константа K зависит от размерностей частоты и расстояния:

- для частоты, выраженной в ГГц, и расстояния, выраженная в км, константа K равна 92.45;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в км, константа K равна 32.4;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в м, константа K равна -27.55.

Потери L_{fs} выразим из уравнения энергетического потенциала канала связи (1.1) как:

$$L_{fs} = P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} + G_{recv} - L_{recv} - SOM - P_{recv}. \quad (1.4)$$

Запас на замирание сигнала, SOM , учитывает все возможные факторы отрицательно влияющие на дальность связи. К таким факторам относятся:

- температурный дрейф чувствительности приемника и выходной мощности передатчика;
- влияние погодных условий на передачу сигнала: туман, снег, дождь;
- потери в антенно-фидерном тракте, возникающие из-за рассогласования фидера и антенны.

Приемник испытывает совокупное воздействие всех этих физических факторов, которые различаются в зависимости от положения приемника и передатчика в среде распространения.

Минимальная значения величины запаса на замирание (System Operating Margin, SOM) должна быть не меньше 10 дБ. Считается, что 10-ти децибельный запас по усилению достаточен для инженерного расчета, но на практике зачастую используют значение 20...30 дБ [10].

Максимально возможную дальность связи между приемником и передатчиком выводится из уравнений (1.3) и (1.4):

$$R = 10^{\frac{L_{fs} - 20 \lg F + G_{tr} + G_{recv} - K}{20}}. \quad (1.5)$$

1.3.3 Модель распространения SUI

Модель распространения SUI (Stanford University Intern) предложена рабочей группой, занимающаяся исследованием беспроводной широкополосной сети IEEE 802.16 [49]. Модель включена в стандарты IEEE и широко используется в WiMax, а также в LTE [50]. Подходит для использования в сельской местности с различным типом рельефа, а также в небольших населенных пунктах. Модель испытана на равнинах, пересеченной, холмистой местности и лесных массивах. SUI модель используется для диапазона частот 1900 МГц – 11 ГГц [51]. Высоты антенн БС в диапазоне от 10 до 80 м, высота антенны мобильного устройства — от 2 до 10 м, расстояние между БС и устройством от 0,1 до 8 км.

Грубая оценка потери сигнал описывается с помощью модели SUI как

$$L_0 = A + 10\gamma \lg(R/R_0), \quad (1.6)$$

$$A = 20 \lg\left(\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right)$$

и

$$\gamma = a - bh_t + \frac{c}{h_t},$$

где R – дальность связи, R_0 – минимальная разрешенная дальность (100 м), $\lambda = c/f$ – длина волны, f – частота в МГц, h_t – высота антенны БС, h_r – высоты антенны устройства. Параметры a, b и c , определяющие следующие типы местности (Таблица 1):

- тип А – холмистая местность или густые лесные массивы;
- тип В – пересеченная местность или полугустые лесные массивы;
- тип С – открытые поля.

Таблица 1 — Численные значения параметров модели SUI.

Параметры модели	Местность А	Местность В	Местность С
a	4,6	4	3.6
b	0,0075	0,0065	0.005
c	12,6	17,1	20

Формула (1.6) была получена эмпирически для несущей частоты 2 ГГц и высоты приемника 2 м. Для использования модели с другими частотами и высотами необходимо добавить поправочные коэффициенты

$$L_{fs} = L_0 + \Delta L_f + \Delta L_h + s, \quad (1.7)$$

где ΔL_f – корректирующий коэффициент для частот свыше 2 ГГц ΔL_h – корректирующий фактор высоты антенны устройства (м) s – корректирующий фактор теневого эффекта, имеющий значения в диапазоне $8,2 < S < 10,6$ дБ. Параметр ΔL_f рассчитывается

$$\Delta L_f = 6 \lg (f/2000),$$

параметр ΔL_h выбирается исходя из выбора типа местности

$$\Delta L_h = \begin{cases} -10,8 \lg (h_r/2) & \text{для типа А и В,} \\ -20 \lg (h_r/2) & \text{для типа С.} \end{cases}$$

Из уравнений (1.3) и (1.7) можно вывести дальность действия связи:

$$R = 10^{\left(\frac{L_{fs}-L_0-\Delta L_f-\Delta L_h-s-A}{10\gamma} + \lg R_0\right)} \quad (1.8)$$

1.3.4 Модель двух лучевого распространения

Двух лучевая модель описывает мощность принятого сигнала как интерференцию двух копий переданного сигнала: первая – луч прямой видимости, вторая – отраженная от поверхности [52]. Два луча электромагнитных волн от передатчика приходят в приемник с определенной разностью фаз и амплитуд. Разность фаз происходит из-за дополнительного времени распространения волны, отраженного от земли [53, 54, 55, 56].

Мощность принимаемого сигнала, в соответствии с двухлучевой моделью равна

$$P_{recv} = \frac{P_{tr} \cdot G_{tr} \cdot G_{recv} \cdot h_{tr}^2 \cdot h_{recv}^2}{R^4}, \quad (1.9)$$

где P_{recv} – чувствительность приемника, P_{tr} – мощность передатчика, G_{tr} – усиление антенны передатчика, G_{recv} – усиление антенны приемника, h_{tr} – высота передатчика, h_{recv} – высота приемника, R – расстояние между приемником и передатчиком.

Потери в свободном пространстве из формулы (1.9) вычисляются как:

$$L_{fs} = 40 \lg R - 10 \lg G_{tr} - 10 \lg G_{recv} - 20 \lg h_{tr} - 20 \lg h_{recv}, \quad (1.10)$$

Тогда из формул (1.3) и (1.10) дальность рассчитывается как

$$R = 10^{\frac{L_{fs} + 10 \lg G_{tr} + 10 \lg G_{recv} + 20 \lg h_{tr} + 20 \lg h_{recv}}{40}}. \quad (1.11)$$

1.3.5 Расчет параметров БС, необходимых для задачи оптимизации

Используя любую из представленных моделей распространения (уравнения (1.5), (1.8) или (1.11)) можно рассчитать теоретическое максимальную дальность связи R_{jq} между базовыми станциями и радиусом покрытия r_j с предположением об отсутствии препятствий, отражений, влияния контуров местности и т. д. Это допущение приемлемо для нашего случая с открытой местностью.

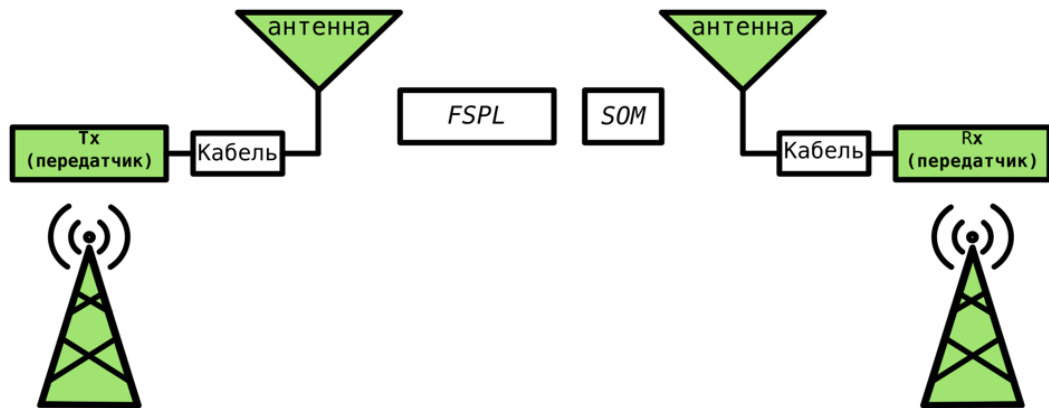


Рисунок 1.6 — Соединение между станциями.

Для расчета дальности связи R_{jq} (Рисунок 1.6), базовые станции s_j и s_q будут рассматриваться как станции *передатчик* и *приемник*, соответственно.

Будем считать, что станции оборудованы направленными антеннами с усилениями G_{tr}^R и G_{recv}^R .

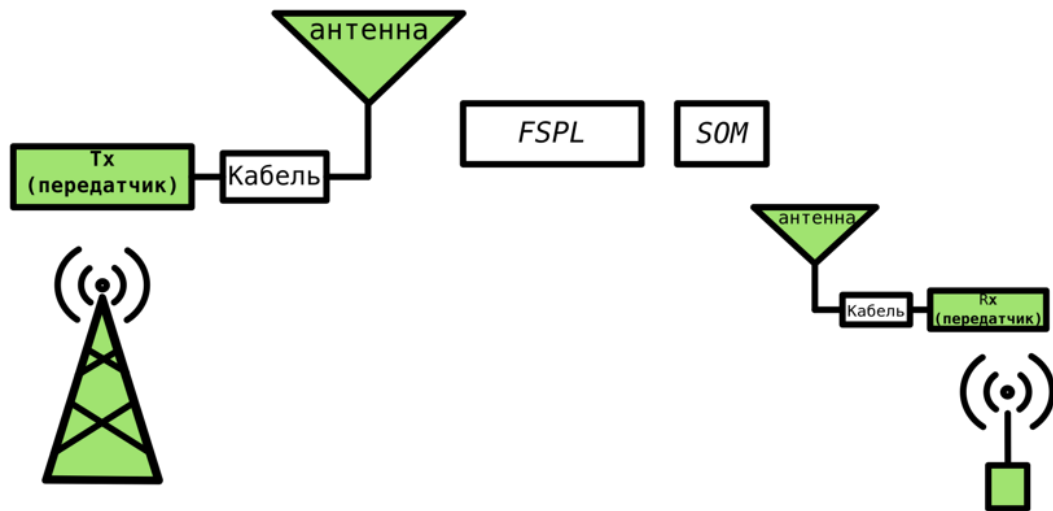


Рисунок 1.7 — Покрывтие станции

Каждая базовая станция оснащена всенаправленной антенной с заданным усилением антенны G_{tr}^r . Данная антенна необходимо для покрытия заданной области.

При вычислении радиуса покрытия r_j (Рисунок 1.7) базовая станция будем считать *передатчиком*, а пользовательское устройство *приемником*.

В приложения А и Б представлены примеры использования модели распространения в свободном пространстве (Free space propagation model) для решения задачи оптимизации.

1.4 Оценка характеристик производительности сети с помощью стохастических моделей массового обслуживания

В данной работе рассматривается задача области телекоммуникационного покрытия при проектировании БШС. С увеличением дальности телекоммуникационного покрытия сети ухудшается качества передачи: уменьшается мощность передаваемого сигнала, и в свою очередь падает пропускная способность. В связи с этим одной из важнейших задач при проектировании является оценки характеристик производительности будущей сети. Одной из такой характеристикой является время межонцовой задержки. Данная характеристика

представляет собой время необходимое для передачи пакета через сеть от источника до места назначения.

1.4.1 Время передачи пакета в канале

удалить это

- формат кадра WiMax
- формат кадра LTE
- формат кадра 5G;

Основой стандарта 802.11 является распределенная функция координации DCF (Distributed coordination function). Согласно данному механизму, станция, желающая передать пакет данных, слушает шумы в передающей среде в течение заранее определённого периода времени. Если передающая среда свободна, станция может передавать пакеты. В противном случае станция ждет определенное количество времени, прежде чем опять предпринять попытку отправки пакета.

Время передачи пакета в беспроводной среде, главным образом зависит от коллизии. Протокол 802.11 борется с данной проблемой с помощью метода множественного доступа к среде с прослушиванием среды и избеганием коллизий (CSMA/CA, Carrier-sense multiple access with collision avoidance), когда станции выполняют процедуру отсрочки (backoff procedure) передачи для всех узлов, которые ожидают передачи. Для решений проблемы "скрытой станции" стандарт поддерживает механизм RTS/CTS (Рисунок 1.8).

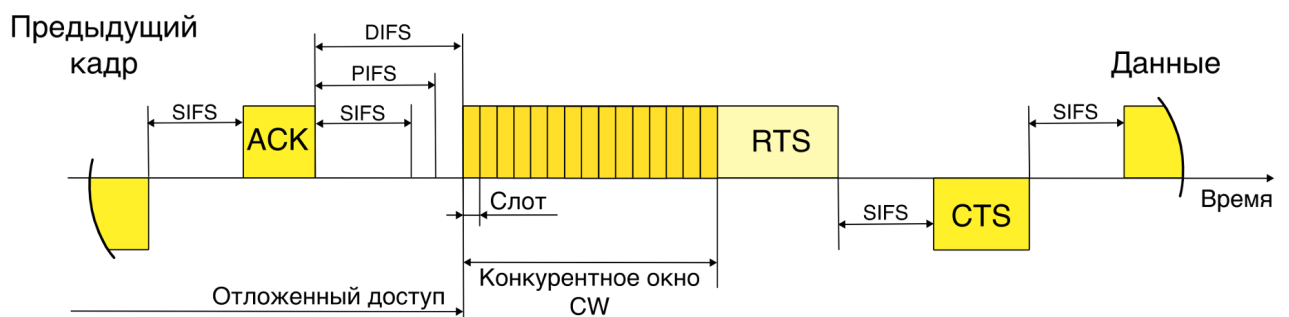


Рисунок 1.8 — Процедура Backoff

На MAC-подуровне для определения состояния среды передачи существуют межкадровые интервалы (Inter Frame Space, IFS) – периоды ожидания

между передачей кадров. В стандарте определено несколько типов межкадровых интервалов:

- уменьшенный межкадровый интервал (Reduced IFS, RIFS), используется в некоторых случаях, когда необходимо уменьшить накладные расходы при передаче;
- короткий межкадровый интервал (Short IFS, SIFS), необходим беспроводному устройству для обработки принятого кадра и ответом об его получении;
- межкадровый интервал функции (PCF IFS, PIFS);
- межкадровый интервал функции (DCF IFS, DIFS);
- арбитражный межкадровый интервал (Arbitration IFS, AIFS), используется устройствами для получения доступа к среде с помощью метода EDCA, поддерживающими QoS (Quality Of Service);
- расширенный межкадровый интервал (Extended IFS, EIFS), является самым длинным интервалом, используется устройством в случае, если кадр пришел с ошибкой.

В течение времени равному интервалу DIFS, станция, желающее передать кадр должна определить состояние среды. По истечению времени DIFS, если среда свободна, начинается процедура отсрочки. Станция начинает период молчания случайной длины, равномерно распределенного в интервале $[0, CW]$, где CW – это окно конкуренции (Contention Window) равное целому числу из интервала $CW_{min} \ll CW \ll CW_{max}$. Далее в соответствии с алгоритмом RTS/CTS каждый узел сети, перед тем как послать данные в «эфир», сначала отправляет специальное короткое сообщение, которое называется RTS (Ready To Send). Это говорит о готовности узла к отправке данных. Такое RTS-сообщение, содержащее информацию о продолжительности предстоящей передачи и об адресате, доступно всем узлам в сети, если только они не скрыты от отправителя. Это позволяет другим узлам задержать передачу на время, равное объявленной длительности сообщения NAV (Network Allocation Vector). Приемная станция, получив сигнал RTS, отвечает посылкой сигнала CTS (Clear To Send), свидетельствующего о готовности станции к приему информации через интервал SIFS. После успешном получении кадра CTS передающая станция выжидает время SIFS и посылает пакет данных. По завершению приемная станция должна послать передатчику кадр ACK, подтверждающий безошибочный прием. Если подтверждение нет, передатчик делает вывод об ошибке [36]. В

таком случае отправитель удваивает период молчания и повторяет передачу кадра, продолжая экспоненциально увеличивать длину паузы. Увеличение CW происходит, пока кадр успешно не будет передан или не будет достигнуто максимальное число повторов.

В 802.11e добавили функцию гибридной координации HCF, основанная на DCF и PCF. В стандарте появился расширенный распределенный доступ к каналу (Enhanced distributed channel access, EDCA). Метод обеспечивает доступ к среде, используя 8 уровней приоритетов пользователей (user priority, IP) и 4 категории доступа (access categories, AC): background (AK_BK), best effort (AK_BE), video (AK_VI), voice (AK_VO). На беспроводном устройстве, реализующем QoS, поддерживаются четыре независимые очереди (Рисунок 1.9). Вместо одного таймера DIFS назначаются различные таймеры AIFS и продолжительность CW для каждой категории AC. Когда станция в сети желает начать передачи, она ждет, пока NAV уменьшится до 0. После, в случае, если канал свободен, станция ждет время AIFS и сразу отсчитывает CW до завершения.

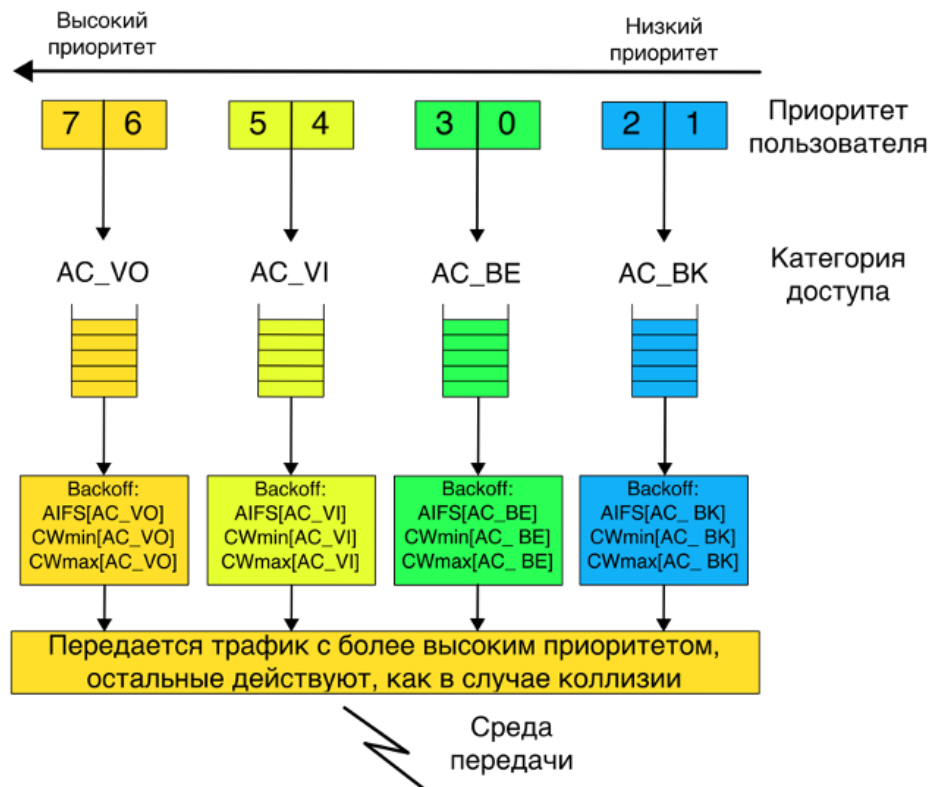


Рисунок 1.9 — Очереди с поддержкой QoS

Функция HCF обеспечивает возможность передавать станции сразу последовательность кадров. Когда станция получает доступ к среде передачи, ей выделяется определенный период времени TXOP(transmission opportunity).

В случае работы TDD имеется только одна несущая частота. Передачи по восходящей и нисходящей линиям связи всегда разделены во времени [57]. Для обеспечения асимметрии трафика восходящего и нисходящего каналов, в TDD поддерживаются 7 различных конфигураций, соответствующих разным соотношениям восходящего и нисходящего каналов

Конфигурация вверх-вниз	Периодичность вверх-вниз	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Таблица 2 — Конфигурации кадра в LTE при временном дуплексе (TDD)

Чтобы удовлетворить различные требования к асимметрии трафика восходящего и нисходящего каналов, в TDD поддерживаются семь различных конфигураций восходящего и нисходящего каналов, обеспечивающих периодичность нисходящий-восходящий канал 5 мс или 10 мс и соотношение нисходящего и восходящего каналов от 2:3 до 9:1. Поскольку количество подкадров восходящей и нисходящей линий связи в радиокadre может различаться, между подкадрами нисходящей и восходящей линий связи нет однозначного отношения, что приводит к некоторым незначительным различиям в структуре сигналов управления между FDD и TDD.

TDD поддерживает 7 различных конфигураций восходящего и нисходящего каналов, соответствующих разным соотношениям восходящего и нисходящего каналов, подробности см. В таблице 4.2-2 документа 36.211. «D» соответствует подкадру нисходящей линии связи, «U» соответствует подкадру восходящей линии связи, а «S» соответствует специальному подкадру. В соответствии со специальным подкадром мы называем подкадры, соответствующие «D» и «U», как нормальные подкадры. Конфигурация восходящей и нисходящей линии связи TDD устанавливается через поле TDD-Config -> subframeAssignment в сообщении RRC.

1.4.2 Расчет межконцевой задержки

Как уже было отмечено ранее, любая сеть обязана гарантировать качество обслуживания QoS. При проектировании БШС важно оценить характеристики производительности будущей сети. Одной из таких характеристик сети является межконцевая (сквозная) задержка [16, 18, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 15, 66], характеризующее максимальное время передачи пакетов в сети от источника до места обозначения.

Для расчета сквозной задержки сети часто используют стохастические модели массового обслуживания [16, 18, 58, 64, 15, 66]. Рассмотрим специальный случай БШС. Все БС связаны последовательно между собой в сеть, образуя линейную топологию. Для расчета межконцевой задержки представим БШС как многофазную сеть массового обслуживания (СеМО) с кросс-трафиком и узлами $M/M/1$ (Рисунок 1.11). Кросс-трафик подразумевает поступление пакетов с некоторой заданной интенсивностью λ на каждую фазу СеМО. Узлами сети являются БС. Согласно символике Дж. Кендала, обозначение M указывает на показательное распределение случайной величины [67, 68]. Каждая такая БС характеризуется случайными величинами входящего потока пакетов и временем их обслуживания, принадлежащие экспоненциальному закону распределения. Каждый узел имеет один обслуживающий прибор. Для такой СеМО принято допущение о бесконечном размере буфера, в котором пакеты ожидают своего обслуживания. Данное допущение позволяет получить аналитическое решение, которое возможно использовать для произвольного размера СеМО данной топологии.



Рисунок 1.11 — СеМО с кросс-трафиком и узлами $M/M/1$

На вход каждой станции поступает пуассоновский поток. Пуассоновский процесс представляет собой случайный процесс, характеризующийся

экспоненциально распределенным временем между событиями. Это один из наиболее важных случайных процессов в теории вероятностей, который широко используется для моделирования поведения трафика и входов во многих коммуникационных сетях и системах [65, 66, 64, 63].

В пуассоновском процессе события происходят непрерывно и независимо друг от друга. Функция распределения имеет вид [67, 68]:

$$P(X < x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Для входящего потока, интервалы между поступлениями заданы случайной величиной с экспоненциальным распределением и интенсивностью λ . Время обслуживания на узле задано также экспоненциальным распределением и интенсивностью μ .

По теореме Бурке [69], поток на выходе узла $M/M/1$, а значит на входе каждой последующей фазы тоже пуассоновский. Интенсивность на выходе каждой фазы равна суммарной интенсивности всех входящих потоков с интенсивностями λ .

Пропускная способность на практике часто составляет половину от заданной в спецификации оборудования [10, 70]. Интенсивность времени обслуживания рассчитывается по формуле:

$$\mu_j = 0.5 \cdot p_j / w,$$

где: p_j - пропускная способность j -ой станции, Мбит/с; w - средний размер пакета, Мбит.

Для каждой станции коэффициент загрузки равен:

$$\rho_j = \frac{\sum \lambda}{\mu_j} = \frac{q \cdot \lambda}{\mu_j} < 1,$$

где q - число входящих потоков. Условие $\rho_j < 1$ является необходимым и достаточным условием существования стационарного режима функционирования СеМО.

Далее по формуле Литтла [71] можно рассчитать время задержки на каждой станции:

$$\overline{T_j} = \frac{\rho_j}{1 - \rho_j} \cdot \frac{1}{q \cdot \lambda}.$$

Тогда межконцевая задержки в сети равна

$$\bar{T} = \sum \bar{T}_j. \quad (1.12)$$

Существуют более сложные модели очередей для оценок характеристик с более сложными видами распределения входящего трафика и времени обслуживания. Адекватные оценки дают модели с коррелированными входным потоком [72, 73, 16, 15]. Для аппроксимации времени обслуживания в беспроводных каналах используют фазовые распределения [73, 16, 15, 74, 75]. К сожалению, такие модели труднорешаемы и использование их в задачах оптимизации нецелесообразно в связи с большими временными затратами на расчет. Исследования таких СеМО представлены в работе [76], в которой был предложен метод калибровки моделей массового обслуживания с помощью имитационного моделирования в среде NS-3 БШС протокола IEEE 802.11n. На вход поступали пакеты, сгенерированные по экспоненциальному закону. С помощью NS-3 была получена выборка, для которой было восстановлено РН-распределения по трем моментам для случая с узлами $M/PN/1/N$ и экспоненциальное распределение по среднему значению для случая с узлами $M/M/1/N$. По умолчанию в NS-3 размер буфера MAC-уровня составляет $N = 500$ [77]. Сравнение моделей представлено на рисунке 1.12. Также представлено модель $M/M/1$ с бесконечным буфером. Как видно их графиков СеМО с узлами $M/M/1$ показывает достаточное приближение. Выбор модели с бесконечным буфером обусловлен тем, что **производители оборудования не указывают в документации размер выделенной памяти для хранения пакетов**. Из результатов сравнения видно, что $M/M/1/N$ и $M/M/1$ отличаются несущественно. Потери пакетов, часто происходят не из-за переполнения буфера памяти, а коллизий и потерь в беспроводном канале. Существенным преимуществом СеМО с узлами $M/M/1$ над другими более сложными моделями является наличие быстрого аналитического решения.

В данном исследовании было решено использовать аналитическую модель СеМО с узлами $M/M/1$ для задачи оптимального размещения. Согласно предложенной концепции проектирования, в дальнейшем полученную БШС, после этапа синтеза топологии, можно будет проверить на более сложных моделях. Этап включает в себя математическое, имитационное моделирования для оценок характеристик производительности как время задержек, длины очередей, пропускная способность, вероятность потери пакетов и т.к. Такой подход про-

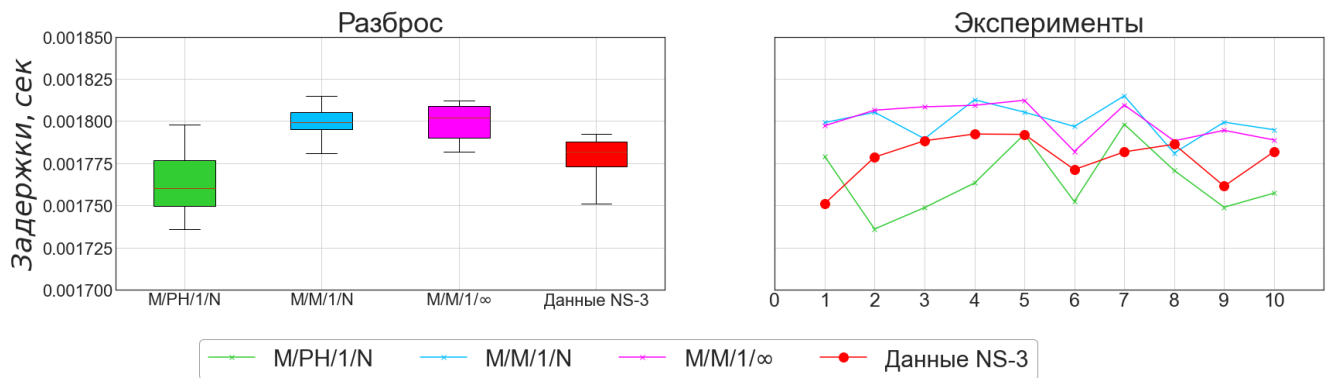


Рисунок 1.12 — Сравнение моделей массового обслуживания с данным NS-3

ектирования позволяет провести комплексную проверку соответствия QoS для полученного размещения БС.

1.5 Выводы

В главе представлены следующие результаты исследования:

1. Обоснована актуальность внедрения БШС в рамках цифровой трансформации нефтегазового сектора «Индустрия 4.0».
2. Представлены этапы комплексного проектирования БШС и место в ней задачи синтеза топологий.
3. Проведен анализ современных беспроводных широкополосных технологий на нефтегазовых месторождениях. Все беспроводные технологии можно разбить на две группы: организация сети для сенсоров с низкоскоростным трафиком и сети дальнего радиуса действия, включающей мультимедийный трафик.
4. Проведен обзор моделей для расчета дальности телекоммуникационной связи. Представлены модели затухания сигнала в свободном пространстве, используемые для сетей семейства протоколов IEEE 802.11.
5. Был проведен анализ работы MAC-уровня сети IEEE 802.11 для оценки времени передачи пакетов в канале.
6. Оценка задержек в каналах БШС проводится с использованием стохастических моделей массового обслуживания. Проведен анализ моделей очередей, широко используемых для оценки производительности сетей телекоммуникации. Для расчета была выбрана аналитическая модель

СеМО с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным временем обслуживания на фазах.

Список литературы

- [1] N.A. Eremin, V.E. Stolyarov и V.I. Shulyatikov. — «Use of control systems in oil and gas fields». — В: *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 9 (2020), с. 17—29. — DOI: 10.33285/0132-2222-2020-9(566)-17-29.
- [2] A Dmitrievskiy и др. — «On the Draft Strategy for Digital Modernization of the Oil and Gas Complex of the Russian Federation». — В: 241 (дек. 2020), с. 9—13.
- [3] Nikolai Eremin и V.E. Stolyarov. — «A gas well as a key object of a digital field». — В: *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 554 (сент. 2019), с. 5—14. — DOI: 10.33285/0132-2222-2019-9(554)-5-14.
- [4] Srinidhi Hiriyannaiah и др. — «A Multi-layered Framework for Internet of Everything (IoE) via Wireless Communication and Distributed Computing in Industry 4.0». — В: *Recent Patents on Engineering* 14.4 (2020), с. 521—529. — DOI: 10.2174/1872212113666190624120121.
- [5] Sathyan Munirathinam. — «Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT)». — В: *Advances in Computers* 117.1 (2020), с. 129—164. — DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.010.
- [6] M. Carmen Lucas-Estañ и др. — «Emerging trends in hybrid wireless communication and data management for the industry 4.0». — В: *Electronics (Switzerland)* 7.12 (2018). — DOI: 10.3390/electronics7120400.
- [7] Hongfang Lu и др. — «Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook». — В: *Computers in Industry* 111 (2019), с. 68—90. — DOI: 10.1016/j.compind.2019.06.007.
- [8] *ГОСТ Р МЭК 62657-2-2016 Сети промышленной коммуникации. Беспроволочные коммуникационные сети. Часть 2. Обеспечение совместимости.* — М.: Стандартинформ, 2016. — 68 с.
- [9] A.N. Dmitrievsky и др. — «Intelligent innovations for wells construction and operation of oil and gas fields». — В: (март 2021), с. 96—104.

- [10] Е.В. Смирнова и др. — *Технология современных беспроводных сетей Wi-Fi*. — Под ред. А.В. Пролетарский. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 446 с.
- [11] Р.А. Дунайцев и К.Ф. Короткин. — «Радиообследование и радиопланирование беспроводных локальных сетей Wi-Fi». — В: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании* (2017), с. 270—274.
- [12] Г. Ж. Уанкпо и др. — «Математическая модель анализа надежности неоднородной дублированной системы передачи данных». — В: *Современные информационные технологии и ИТ-образование* 16.2 (2020), с. 285—294.
- [13] Achyutha Krishnamoorthy, Anu Nuthan Joshua и Dmitry Kozyrev. — «Analysis of a Batch Arrival, Batch Service Queuing-Inventory System with Processing of Inventory While on Vacation». — В: *Mathematics* 9.4 (2021), с. 1—29. — DOI: 10.3390/math9040419.
- [14] Dmitry Kozyrev и Dmitry Radkevich. — «Reliability estimation of a broadband wireless network with linear topology and cross redundancy». — В: *AIP Conference Proceedings* 2116 (2019). — DOI: 10.1063/1.5114073.
- [15] Andrey Larionov и др. — «A Multiphase Queueing Model for Performance Analysis of a Multi-hop IEEE 802.11 Wireless Network with DCF Channel Access». — В: *Communications in Computer and Information Science* 1109 (2019), с. 162—176. — DOI: 10.1007/978-3-030-33388-1_14.
- [16] Vladimir Vishnevsky и др. — «Methods of performance evaluation of broadband wireless networks along the long transport routes». — В: *Communications in Computer and Information Science* 601 (2016), с. 72—85. — DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2_8.
- [17] Vladimir Vishnevsky и др. — «Review of methodology and design of broadband wireless networks with linear topology». — В: *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics* 47.2 (2016), с. 329—342. — DOI: 10.1007/s13226-016-0190-7.
- [18] Danmeng Wang. — «Delay prediction with enhanced queueing models and survival analysis». — В: *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2016*. — IEEE, нояб. 2017, — С. 1101—1105. — ISBN: 9781509055210. — DOI: 10.1109/ICSAI.2016.7811115. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7811115/>.

- [19] Werner Sandmann. — «Delays in a series of queues with correlated service times». — В: *Journal of Network and Computer Applications* 35.5 (2012), с. 1415—1423. — DOI: 10.1016/j.jnca.2011.10.009.
- [20] Hendrik Baumann и Werner Sandmann. — «Multi-server tandem queue with Markovian arrival process, phase-type service times, and finite buffers». — В: *European Journal of Operational Research* 256.1 (2017), с. 187—195. — DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.035.
- [21] В. Т. Еременко и др. — В: *Информационные системы и технологии* 78.4 (2013), с. 96—105.
- [22] Attila Lovas и Miklós Rásonyi. — «Markov chains in random environment with applications in queuing theory and machine learning». — В: *Stochastic Processes and their Applications* 137 (2021), с. 294—326. — DOI: 10.1016/j.spa.2021.04.002.
- [23] Rinda Parama Satya Hermanto и др. — «Waiting-Time Estimation in Bank Customer Queues using RPROP Neural Networks». — В: *Procedia Computer Science* 135 (2018), с. 35—42. — DOI: 10.1016/j.procs.2018.08.147.
- [24] Heitor Florencio, Adrião Dória Neto и Daniel Martins. — «Isa 100.11a networked control system based on link stability». — В: *Sensors (Switzerland)* 20.18 (2020), с. 1—22. — DOI: 10.3390/s20185417.
- [25] Сидней Хилл. — «Беспроводные технологии в «цифровом» нефтегазовом промысле». — В: *Control Engineering* 4.58 (2015), с. 58—61.
- [26] Тагиров Денис. — «WirelessHART, пожалуй, единственный беспроводной протокол связи, удовлетворяющий требованиям рынка АСУТП». — В: *Промышленные АСУ и контроллеры* 8 (2013), с. 58—61.
- [27] А.В. Чупаев и др. — «Беспроводные промышленные сети на базе ISA-100.11.a и WirelessHart. Расчет основных энергетических и информационных параметров». — В: *Вестник технологического университета* 21.7 (сент. 2018), с. 5—14.
- [28] Hongyuan Yang и др. — «An efficient equal air-time transmission strategy for wireless seismometer array based on LoRaWAN with cuckoohash». — В: *IEEE Access* 8 (2020), с. 201713—201727. — DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3034332.

- [29] Stefano Savazzi и др. — «Ultra-wide band sensor networks in oil and gas explorations». — В: *IEEE Communications Magazine* 51.4 (2013), с. 150—160. — DOI: 10.1109/MCOM.2013.6495774.
- [30] В. М. Вишневикий, С.Л. Портной и Шахнович И.В. — *Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G*. — Москва: Техносфера, 2009. — 472 с.
- [31] *Интеллектуальная частная беспроводная сеть для работы SMARTField*. — URL: https://comptek.ru/materials/rajant/RU_rajant-oil-and-gas-brochure-012820_digital.pdf.
- [32] *Решения Cisco ускоряют цифровую трансформацию нефтегазовой отрасли и помогают добывать нефть за Полярным кругом*. — URL: https://www.cisco.com/c/ru_ru/about/press/press-releases/2020/03-05.html.
- [33] *Wireless Connectivity Solutions for Oil and Gas*. — URL: https://www.cambiumnetworks.com/wp-content/uploads/2017/03/BR_oilGasUtilities_01162018_pages.pdf.
- [34] *Industrial Communication Solutions for the Oil and Gas Industry*. — URL: <https://www.gegridsolutions.com/communications/pdf/ics%20oil%20&%20gas-web.pdf>.
- [35] В. Олифер и Н. Олифер. — *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание*. — СПб: Питер, 2020. — 1008 с.
- [36] Э. Таненбаум и Д. Уэзеролл. — *Компьютерные сети. 5-е изд.* — СПб: Питер, 2022. — 960 с.
- [37] 802.11 WG - Wireless LAN Working Group. — *IEEE 802.11-2020 - IEEE 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)*. — 2020. — URL: https://standards.ieee.org/standard/802_11-2020.html.
- [38] David D Coleman и David A Westcott. — «CWNA: Certified Wireless Network Administrator Study Guide». — В: *CWNA: Certified Wireless Network Administrator Study Guide* (2018). — DOI: 10.1002/9781119549406.

- [39] В.М. Вишневский и др. — «Методы исследования и проектирования широкополосных беспроводных сетей вдоль протяженных транспортных магистралей». — В: *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт* 9.5 (2015), с. 9—15.
- [40] IEEE 1609 Working Group. — *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*. — 2014, — С. 1—78. — ISBN: 9780738187563. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8686445>.
- [41] В. О Тихвинский, С. В. Терентьев и В. П. Высочин. — *Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура*. — Москва: Издательский дом Медиа паблишер, 2014, — С. 384. — ISBN: 978-5-88405-097-5.
- [42] Rida El Chall, Samer Lahoud и Melhem El Helou. — «LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon». — В: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019), с. 2366—2378. — DOI: 10.1109/JIOT.2019.2906838.
- [43] Yaokun Zhang и Tianfeng Yan. — «Loss Correction of Wireless Model in Complex Multi Wall Environment». — В: *Journal of Physics: Conference Series* 1757.1 (2021). — DOI: 10.1088/1742-6596/1757/1/012137.
- [44] Giuseppe Caso и Luca De Nardis. — «On the applicability of multi-wall multi-floor propagation models to WiFi fingerprinting indoor positioning». — В: *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST* 159 (2015), с. 166—172. — DOI: 10.1007/978-3-319-27072-2_21.
- [45] Taewon Kang и Jiwon Seo. — «Practical simplified indoor multiwall path-loss model». — В: *International Conference on Control, Automation and Systems* 2020-Octob (2020), с. 774—777. — DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268260.
- [46] О. О. Oni и F. E. Idachaba. — «Review of Selected Wireless System Path loss Prediction Models and its Adaptation to Indoor Propagation Environments». — В: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 2228 (2017), с. 562—567.
- [47] ГКРЧ Нормы 18-13. Радиопередающие устройства гражданского назначения. Требования на допустимые уровни побочных излучений. — М., 2013.

- [48] Evgenii Krouk и Sergei Semenov. — «Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications». — B: *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications* (2010), с. 1—662. — DOI: 10.1002/9780470976777.
- [49] Ms Mollel и M Kisangiri. — «Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication». — B: *Computer Engineering and Intelligent Systems* 5.9 (2014), с. 1—11. — URL: <http://iiste.org/Journals/index.php/CEIS/article/view/15435>.
- [50] Aymen Zreikat и Milan Dordevic. — «Performance Analysis of Path loss Prediction Models in Wireless Mobile Networks in Different Propagation Environments». — B: *Proceedings of the 3rd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science* (2017). — DOI: 10.11159/vmw17.103.
- [51] Umut Can Cabuk и др. — «Path Loss Estimation of Air-to-Air Channels for FANETs over Rugged Terrains». — B: *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings* (2020). — DOI: 10.1109/SIU49456.2020.9302160.
- [52] Miguel Gutierrez Gaitan и др. — «Experimental evaluation of the two-ray model for near-shore WiFi-based network systems design». — B: *IEEE Vehicular Technology Conference 2020-May* (2020). — DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129548.
- [53] Michael Rademacher, Markus Kessel и Karl Jonas. — «Experimental Results For the Propagation of Outdoor IEEE802.11 Links». — B: *VDE ITG-Fachbericht Mobilkommunikation* (2016).
- [54] Manlio Bacco, Erina Ferro и Alberto Gotta. — «UAVs in WSNs for agricultural applications: An analysis of the two-ray radio propagation model». — B: *Proceedings of IEEE Sensors 2014-December*.December (2014), с. 130—133. — DOI: 10.1109/ICSENS.2014.6984950.
- [55] Erich Zochmann, Ke Guan и Markus Rupp. — «Two-ray models in mmWave communications». — B: *IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC 2017-July* (2017), с. 1—5. — DOI: 10.1109/SPAWC.2017.8227681.

- [56] Sinan. Kurt и Bulent Tavli. — «Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks». — В: *Ieee Antennas and Propagation Magazine* 59 (2017), с. 18—37.
- [57] A David и др. — «LTE : The Evolution of Mobile Broadband». — В: *IEEE communications magazine* 47.4 (2009), с. 44—52.
- [58] Jia Liu и др. — «End-to-End Delay Modeling in Buffer-Limited MANETs: A General Theoretical Framework». — В: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15.1 (2016), с. 498—511. — DOI: 10.1109/TWC.2015.2475258. — arXiv: 1509.06969.
- [59] Gongpu Chen и др. — «Joint scheduling and channel allocation for end-to-end delay minimization in industrial WirelessHART Networks». — В: *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019), с. 2829—2842. — DOI: 10.1109/IIOT.2018.2875508.
- [60] Inès Hosni и Fabrice Théoleyre. — «Self-healing distributed scheduling for end-to-end delay optimization in multihop wireless networks with 6TiSch». — В: *Computer Communications* 110 (2017), с. 103—119. — DOI: 10.1016/j.comcom.2017.05.014.
- [61] Antonio Capone и др. — «Minimizing end-to-end delay in multi-hop wireless networks with optimized transmission scheduling». — В: *Ad Hoc Networks* 89 (2019), с. 236—248. — DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.01.004.
- [62] Nasim Abbas и Fengqi Yu. — «Performance analysis of end-To-end delay and reliability for linear wireless multimedia sensor networks». — В: *Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2017* 2017-January (2017), с. 554—558. — DOI: 10.1109/ITOEC.2017.8122358.
- [63] Hafez Seliem и др. — «On the End-to-End Delay in a One-Way VANET». — В: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.9 (2019), с. 8336—8346. — DOI: 10.1109/TVT.2019.2916936.
- [64] Filippo Malandra и Brunilde Sanso. — «A Markov-Modulated End-to-End Delay Analysis of Large-Scale RF Mesh Networks with Time-Slotted ALOHA and FHSS for Smart Grid Applications». — В: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.11 (2018), с. 7116—7127. — DOI: 10.1109/TWC.2018.2860965.

- [65] Anders Ellersgaard Kalor и др. — «Network slicing in industry 4.0 applications: Abstraction methods and end-to-end analysis». — В: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14.12 (2018), с. 5419—5427. — DOI: 10.1109/TII.2018.2839721.
- [66] Yan Gao и др. — «Characterization and Optimization of Delay Guarantees for Real-Time Multimedia Traffic Flows in IEEE 802.11 WLANs». — В: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 15.5 (2016), с. 1090—1104. — DOI: 10.1109/TMC.2015.2407395.
- [67] В. М. Вишнеvский. — *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. — Москва: Техносфера, 2003. — 512 с.
- [68] Leonard Kleinrock. — *Theory, Volume 1, Queueing Systems*. — USA: Wiley-Interscience, 1975. — ISBN: 0471491101.
- [69] Paul J. Burke. — «The Output of a Queueing System». — В: *Operations Research* 4.6 (1956), с. 699—704. — DOI: 10.1287/opre.4.6.699.
- [70] С. С. Владимиров. — *Беспроводные системы передачи данных. Расчет параметров БСПД на основе технологий 802.11 и 802.16 : практикум*. — СПб: СПб- ГУТ, 2019. — 27 с.
- [71] John D. C. Little. — «A Proof for the Queueing Formula: $L = \lambda W$ ». — В: *Operations Research* 9.3 (1961), с. 383—387. — DOI: 10.1287/opre.9.3.383.
- [72] V. M. Vishnevskii и A. N. Dudin. — «Queueing systems with correlated arrival flows and their applications to modeling telecommunication networks». — В: *Automation and Remote Control* 78.8 (2017), с. 1361—1403. — DOI: 10.1134/S000511791708001X.
- [73] Vladimir Vishnevsky и др. — «State reduction in analysis of a tandem queueing system with correlated arrivals». — В: *Communications in Computer and Information Science* 800 (2017), с. 215—230. — DOI: 10.1007/978-3-319-68069-9_18.
- [74] Ken'ichi Kawanishi и Tetsuya Takine. — «The M/PH/1+D queue with Markov-renewal service interruptions and its application to delayed mobile data offloading». — В: *Performance Evaluation* (2019). — DOI: 10.1016/j.peva.2019.102002.

- [75] Ozancan Dogan и Nail Akar. — «The Multi-Source Probabilistically Preemptive M/PH/1/1 Queue with Packet Errors». — B: *IEEE Transactions on Communications* (2021). — DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3106347.
- [76] A A Larionov, A A Mukhtarov и A M Sokolov. — «The calibration method of a tandem queueing model with PH service time using NS-3 simulation of a multihop wireless network». — B: *Journal of Physics: Conference Series* 2091.1 (2021), с. 012030. — DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012030.
- [77] *ns3::WifiMacQueue Class Reference*. — URL: https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_wifi_mac_queue.html.