

## Оглавление

|   | Стр. |
|---|------|
| <b>Введение</b> . . . . .   | 5    |
| <b>Глава 1. Внедрение БШС на нефтегазовых месторождениях</b> . .  | 10   |
| 1.1 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий<br>передачи данных . . . . .  | 11   |
| 1.2 Этапы проектирования БШС . . . . .  | 13   |
| 1.3 Определение расчетных параметров БШС, необходимых для<br>решения задач размещения базовых станций . . . . .                                       | 15   |
| 1.3.1 Энергетический потенциал канала связи . . . . .   | 17   |
| 1.3.2 Модель потерь в свободном пространстве . . . . .  | 19   |
| 1.3.3 Модель распространения SUI . . . . .  | 21   |
| 1.3.4 Модель двух лучевого распространения . . . . .  | 23   |
| 1.3.5 Расчет параметров БС, необходимых для задач<br>оптимизации . . . . .  | 24   |
| 1.4 Оценка характеристик производительности сети с помощью<br>стохастических моделей массового обслуживания . . . . .                                 | 24   |
| 1.4.1 Время передачи пакета в канале . . . . .  | 24   |
| 1.4.2 Расчет межконцевой задержки . . . . .   | 24   |
| 1.5 Выводы по главе 1 . . . . .   | 26   |
| <b>Глава 2. Размещения базовых станций БШС для покрытия<br/>        линейной территории</b> . . . . .   | 26   |
| 2.1 Актуальность внедрения БШС для линейного участка на<br>месторождении . . . . .  | 26   |
| 2.2 Математические модели синтеза топологии сети для охвата<br>линейного участка в виде задачи целочисленного линейного<br>программирования . . . . . | 29   |
| 2.2.1 Постановка задачи . . . . .   | 30   |
| 2.2.2 Модель целочисленного линейного программирования . .  | 31   |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.3   | Математические модели синтеза топологии сети для охвата<br>линейного участка в виде экстремальной задачи в<br>комбинаторной форме . . . . . | 37        |
| 2.3.1   | Постановка задачи и ее формулировка в экстремальной<br>комбинаторной форме . . . . .  | 37        |
| 2.3.2   | Дерево ветвлений для перебора элементов в множестве $\Gamma$ .  | 39        |
| 2.3.3   | Метод ветвей и границ для задачи размещения БС . . . .  | 42        |
| 2.3.4   | Построения последовательности топологий для<br>итерационной процедуры моделирования БШС . . . . .   | 47        |
| 2.4   | Сравнительная оценка полученных моделей . . . . .   | 48        |
| 2.5   | Выводы по Главе 2 . . . . .   | 53        |
| <b>Глава 3. Размещение базовых станций БШС для<br/>обслуживания множества рассредоточенных объектов .</b> |   | <b>55</b> |
| 3.1   | Актуальность внедрения БШС для обслуживания<br>рассредоточенных объектов на месторождении . . . . .   | 55        |
| 3.2   | Задача при заданных местах размещения станций. . . . .  | 56        |
| 3.3   | Оптимизационная задача выбора набора размещаемых станций<br>и определения мест их размещения . . . . .                                      | 59        |
| 3.3.1   | Постановка задачи. . . . .  | 59        |
| 3.3.2   | Построение матрицы смежности . . . . .  | 61        |
| 3.3.3   | Математическая модель частично целочисленного<br>линейного программирования . . . . .   | 62        |
| 3.4   | Выводы к главе 3 . . . . .  | 63        |
| <b>Заключение . . . . .</b>   |   | <b>65</b> |
| <b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>   |   | <b>66</b> |
| <b>Словарь терминов . . . . .</b>   |   | <b>67</b> |
| <b>Список литературы . . . . .</b>  |   | <b>68</b> |
| <b>Список рисунков . . . . .</b>  |   | <b>80</b> |
| <b>Список таблиц . . . . .</b>  |   | <b>81</b> |

|   |    |
|---|----|
| Приложение А. Сравнения оценок «недопокрытия» для задачи<br>2, 3 и 4 . . . . .  | 82 |
| Приложение Б. Числовой пример решения задачи алгоритмом<br>на основе метода ветвей и границ . . . . .   | 83 |
| Приложение В. Числовой пример оптимального размещения<br>базовых станций сети с линейной топологией в<br>виде экстремальной задачи в комбинаторной<br>форме . . . . . | 88 |
| В.0.1 Расчет радиуса связи и радиуса покрытия станций . . . . .   | 90 |
| Приложение Г. Численный пример оптимального размещения<br>базовых станций для обслуживания заданного<br>множества рассредоточенных объектов . . . . .                 | 92 |
| Приложение Д. Численный пример оптимального размещения<br>базовых станций сети с линейной топологией в<br>виде задачи ЦЛП . . . . .                                   | 96 |

## 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].

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 [7]. 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 [8].

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 Анализ современных беспроводных широкополосных технологий передачи данных

— сенсорные сети

- беспроводная передача

- 

БС организуются в сети WiMax и Wi-Fi

Для обеспечения связи между станциями буду использовать Wi-Fi

При внедрении беспроводных технологий необходимо учитывать специфику выполняемых задач будущей сети. Для каждой 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.

IWN унаследовали многие функции WSN, особенно протоколы связи и промышленные приложения [91]. Однако из-за особенностей промышленной среды и того, что промышленные беспроводные сети Индустрии 4.0 отличаются от традиционных WSN [17, 37], существуют некоторые новые ограничения и требования к IWN. Основные различия между IWN и WSN перечислены ниже:

IWN с задержкой используются в отраслевых системах для определения важных параметров, таких как мониторинг состояния машины и рабочей среды или предоставление команд управления и информации в реальном времени. Поэтому этим приложениям требуется низкая задержка. В большинстве случаев это происходит за счет энергопотребления и высоких затрат на достижение производительности в реальном времени. Напротив, WSN ограничены энергией, и узлы могут быть развернуты в недоступных доменах, что затрудняет замену или обновление батарей. Как следствие, необходимо максимально увеличить время автономной работы в WSN, что приведет к увеличению задержки.

Мобильность Как обсуждалось выше, для повышения гибкости и мобильности для Индустрии 4.0 IWN могут содержать больше движущихся узлов, таких как мобильные продукты, мобильные роботы, автомобили с автоматическим наведением, беспилотные летательные аппараты, рабочие и другие мобильные устройства. Это контрастирует с узлами WSN, которые обычно считаются стационарными или с несколькими движущимися узлами, такими как движущийся приемник, ретрансляционные узлы и т. Д.

Среды Еще одно существенное различие между IWN и WSN - это операционная среда. Во-первых, в промышленной сфере IWN работают в сложных условиях из-за пыли, вибрации, тепла, различных препятствий, а также более

высокой температуры и влажности. Во-вторых, существуют более серьезные помехи сигналам от двигателей и других беспроводных сетей, чем для традиционных WSN. Кроме того, промышленная среда может легко повлиять на радиоканал, который отличается от WSN. Следовательно, IWN нуждаются в дополнительных стратегиях, чтобы гарантировать надежность и эффективную связь. Напротив, узлы WSN развернуты в относительно стабильной и дружелюбной среде.

**Производительность** Для Индустрии 4.0 все оборудование, устройства, рабочие, терминалы и другие узлы могут выполнять сложные задачи индивидуально и взаимодействовать с другим оборудованием. Специально для IWN узлы не только обмениваются данными со своими соседями для выполнения механических задач, таких как перемещение, закрепление и транспортировка, но также должны справляться с такими проблемами, как помехи сигнала, пути перемещения и обработка данных. Как следствие, с точки зрения пропускной способности узлов, узлам IWN требуются более высокие мощности для обработки данных, энергии и хранения, и они более умны, чем традиционные узлы WSN.

## 1.2 Этапы проектирования БШС

Для обеспечения высокого качества беспроводной связи необходимо проводить грамотное проектирование БШС. Существуют различные подходы к проектированию беспроводных сетей. Для одних задач является максимальной зона покрытия, для других – достижения максимальной производительности передачи данных, для третьих – нахождения баланса между зоной охвата и производительностью [9]. 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):

Любое проектирование БШС всегда начинается с первоначального обследования местности. В данный этап входят задачи радиобследования и радиопланирования. оценки реальных размеров области контроля, наличие

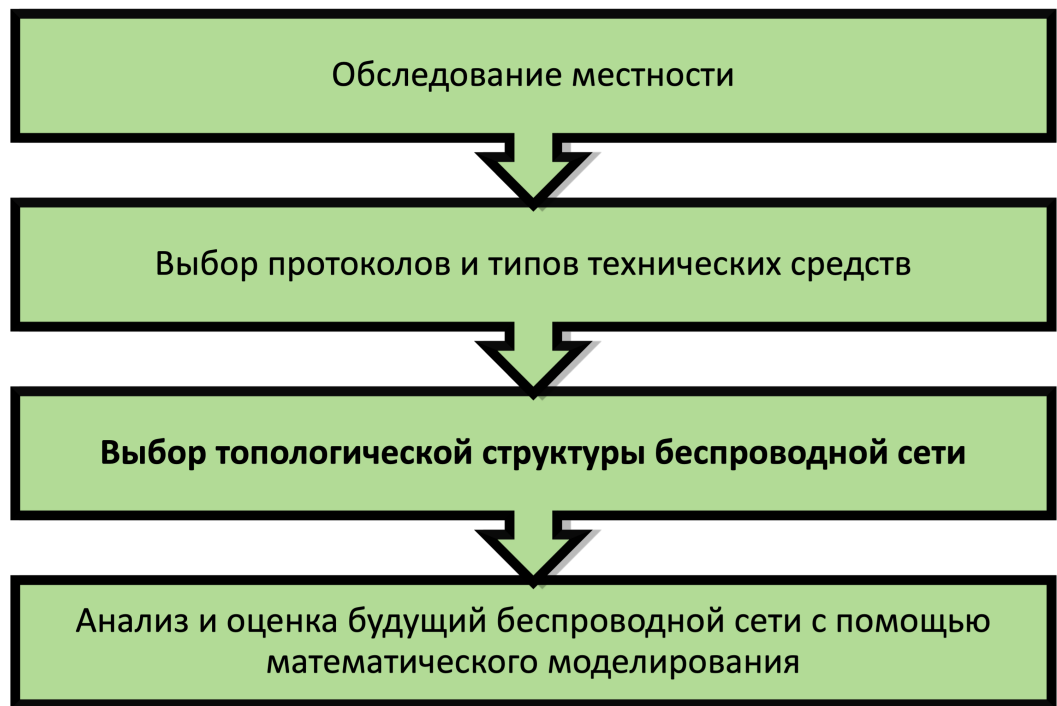


Рисунок 1.2 — Этапы проектирования БШС.

стационарных инженерно-технических сооружений, мешающих передачи 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 [10]. На основе результатов данного этапа проводится выбор типа 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 [9]. 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 пробле-



мы 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 [11, 12, 13], оценка характеристик качества канала, вероятности потери пакетов, пропускной способности, времени доставки сообщений в сети [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], оценка межконтинентальной задержки сети [18, 19]. В работе [21] рассматривают стохастическую модель марковской цепи для оценки качества предоставления информационных услуг передачи данных автоматизации 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.

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

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 устрой-

ствами. 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 [24, 25, 26, 27]. Существуют различные модели, которые можно объединить в три основные категории [28]:

- теоретические модели. Данные модели обычно основаны 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 ситуаций 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.

Существуют большое количество моделей распространения. Каждая имеет свои плюсы и минусы. В зависимости от конкретных задач при проектировании возможно использовать каждую из них. В данном исследовании используется простейшая модель распространения в свободном пространстве (Free space propagation model).

### 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 1.3) [9].

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.

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

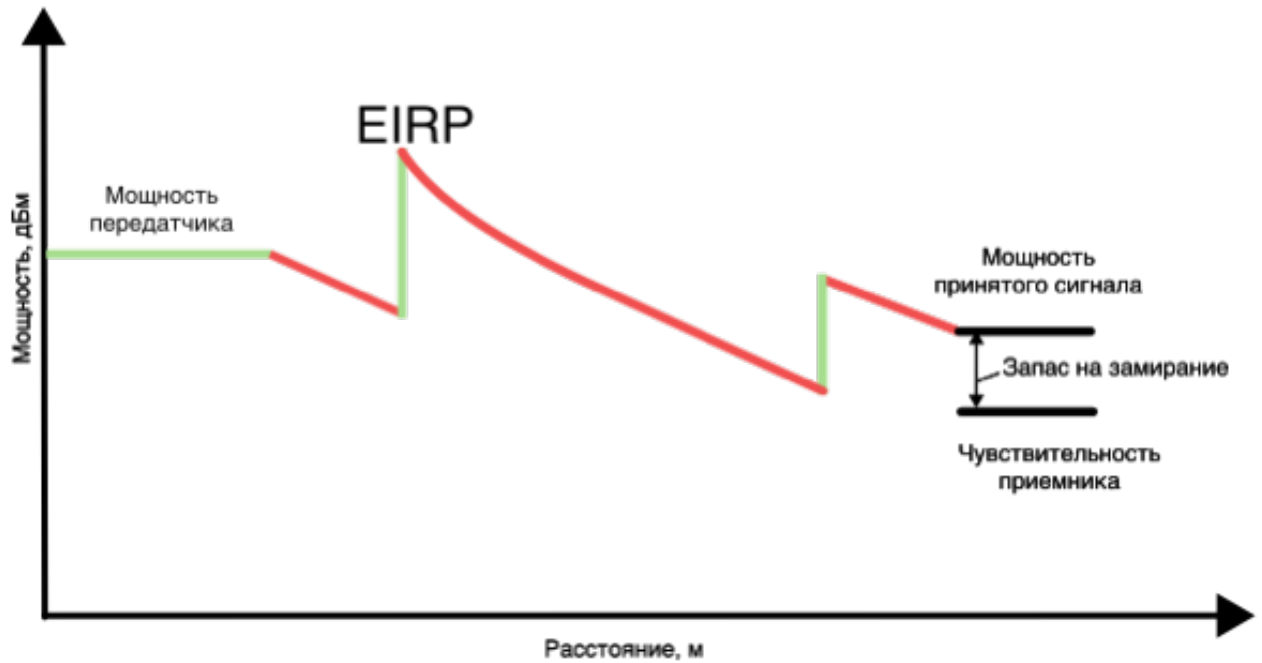


Рисунок 1.3 — Энергетический потенциал линии связи.

поддерживаемого оборудованием стандарта и конкретных скоростей. В реальной 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 [29].

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 [7].

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.

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 [30]. Передающий сигнал рассеивается по мере увеличения расстояния между приемником и передатчиком. Данный тип затухания называется потерями в свободном пространстве (Free Space Path Loss, *FSPL*).

### 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.

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

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

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 децибелный запас по усилению достаточен для инженерного расчета, но на практике зачастую используют значение 20...30 дБ [9].

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

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

Используя формулу (1.5) и (1.4), мы можем 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.

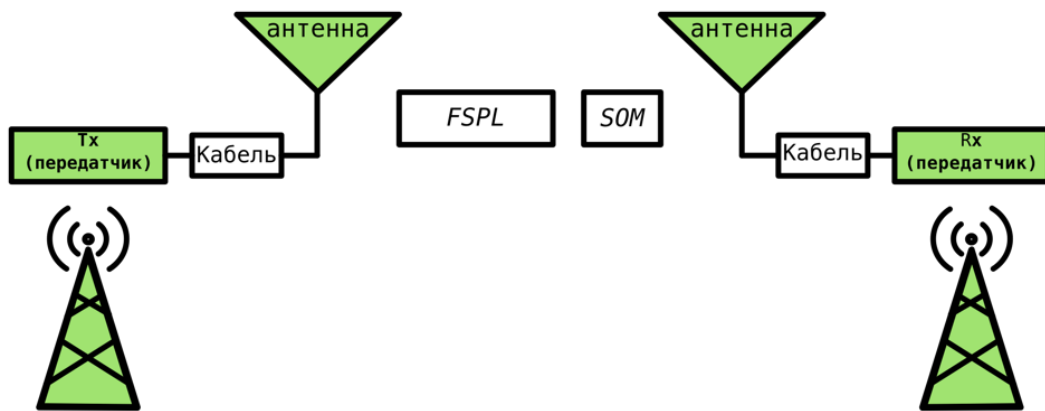


Рисунок 1.4 — Соединение между станциями.

Для расчета дальности связи  $R_{jq}$  (Рисунок 1.4), 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  $G_{recv}^R$ .

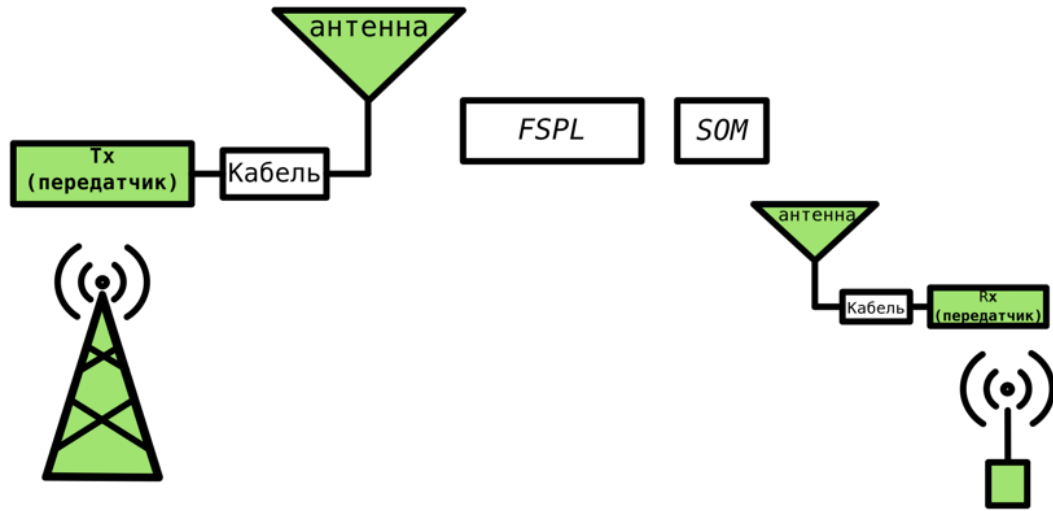


Рисунок 1.5 — Покрывтие станции

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

При вычислении радиуса покрытия  $r_j$  (Рисунок 1.5) базовая станция будем считать *передатчиком*, а пользовательское устройство *приемником*.

### 1.3.3 Модель распространения SUI

Модель распространения SUI (Stanford University Intern) предложена рабочей группой, занимающаяся исследованием беспроводной широкополосной сети IEEE 802.16 [31]. Модель включена в стандарты IEEE и широко используется в WiMax, а также в LTE [32]. 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 [33]. 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 SU1.

| 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          |

### ДОДЕЛАТЬ SU1 И ДОБАВИТЬ ДВУХЛУЧЕВУЮ

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

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

параметр  $\Delta L_h$  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 (1.6) 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 [34]. 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 [35, 36, 37, 38].

**Проверить**

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 формулы (1.10) дальность рассчитывается как:

**ПЕРЕДЕЛАТЬ ФОРМУЛУ ФРИИСА, ЧТОБЫ УЧИТЫВАТЬ НЕИЗОТРОПНЫЕ АНТЕННЫ**

**ВЕЗДЕ ПРОВЕРИТЬ ЛОГАРИФМ ПО ОСНОВАНИЮ 10**

### 1.3.5 Расчет параметров БС, необходимых для задач оптимизации

## 1.4 Оценка характеристик производительности сети с помощью стохастических моделей массового обслуживания

### 1.4.1 Время передачи пакета в канале

### 1.4.2 Расчет межконцевой задержки

Как уже было отмечено ранее, одним из важных ключевых задач при проектировании БШС является оценка ее характеристик производительности для удовлетворения требуемого качества обслуживания (quality of service, QoS). Одной из основных характеристик проектируемой сети является ее межконцевая задержка [16, 18, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 15, 47]. Для расчета сквозной задержки сети используют стохастические модели массового обслуживания [16, 18, 39, 45, 15, 47].

Пусть задан частный случай БШС. Все БС связаны последовательно между собой в сеть с линейной топологией. Для расчета межконцевой задержки в простейшем случае рассмотрим беспроводную сеть как сеть массового обслуживания (СеМО) с кросс-трафиком и узлами  $M/M/1$  (Рисунок 1.6).

Узлами сети являются БС. Согласно символике Дж. Кендала, обозначение  $M$  указывает на показательное распределение случайной величины [48, 49]. 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 для данной топологии.

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

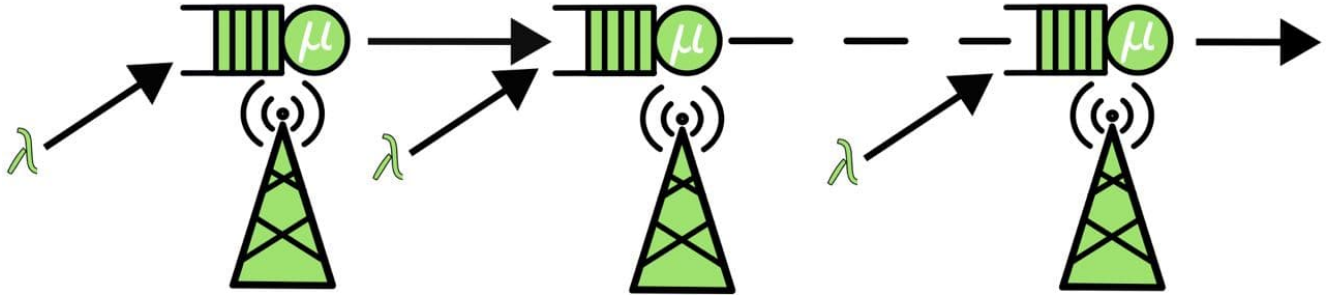


Рисунок 1.6 — СеМО с кросс-трафиком и узлами  $M/M/1$ .

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 [46, 47, 45, 44].

В пуассоновском процессе события происходят непрерывно и независимо друг от друга. Функция распределения имеет вид [48, 49]:

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

Для входящего потока, интервалы между поступлениями заданы случайной величиной с экспоненциальным распределением и интенсивностью  $\lambda$ . Время обслуживания на узле задано также экспоненциальным распределением и интенсивностью  $\mu$ .

По теореме Бурке [50], 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  $\lambda$ .

Пропускная способность на практике часто составляет половину от заданной в спецификации оборудования [9, 51]. 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 [52] 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

$$\overline{T} = \sum \overline{T}_j. \quad (1.11)$$

Существуют более сложные модели очередей для оценок характеристик с более сложными распределения входящего трафика и времени обслуживания. Адекватные оценки дают модели с коррелированными входным потоком [16, 15]. К сожалению, такие модели труднорешаемы и для большего числа фаз СеМО не имеют аналитических расчетов. В данном исследовании будем использовать простейшую модель СеМО с узлами  $M/M/1$  на этапе задачи оптимального размещения. Согласно предложенной концепции проектирования, полученную БШС с размещенными БС и выбранным техническим оборудованием можно будет в дальнейшем проводить на более сложных моделях на следующем этапе моделирования сети. Этот этап включает в себя математическое, имитационное моделирование для оценок характеристик производительности как время задержек, длины очередей, пропускная способность, вероятность потери пакетов и др. Данный этап позволяет провести комплексную проверку соответствия QoS для полученного размещения БС.

## 1.5 Выводы по главе 1

В главе представлено актуальность внедрения БШС в рамках цифровой трансформации нефтегазового сектора «Индустрия 4.0». Представлены тематика исследования и задачи, затронутые в диссертации в рамках данного внедрения, а именно задачи синтеза топологии при проектировании беспроводных телекоммуникации на месторождении. Представлена структура

последовательностей этапов при проектировании и место задачи синтеза в ней. Представлены методика расчета параметров БС необходимых в дальнейшем для оптимизационных задач размещения БС.