

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых



На правах рукописи

Насир Самах Аббас Хассан

**Разработка и исследование модели каналов линий связи
космический аппарат-Земля при пыльных бурях**

Специальность: 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н. профессор А.Г. Самойлов

Владимир – 2022 г.

Список принятых сокращений		4
Введение		5
Глава I.	Системы спутниковой радиосвязи и их радиоканалы	12
§ 1.1.	Системы спутниковой радиосвязи	12
§ 1.2.	Радиоканалы спутниковых геостационарных ретрансляционных систем	22
§ 1.3.	Особенности каналов связи космических аппаратов с высокоэллиптическими орбитами	35
§ 1.4.	Радиоканалы низкоорбитальных космических аппаратов	41
§ 1.5.	Постановка задачи исследования	47
Выводы	.....	48
Глава II.	Замирания сигналов в каналах спутниковой радиосвязи	49
§ 2.1.	Влияние ионосферы на сигналы спутниковой радиосвязи	49
§ 2.2.	Затухание спутниковых сигналов при распространении через атмосферу	55
§ 2.3.	Влияние радиационных поясов Земли	59
§ 2.4.	Классификация пыльных и песчаных бурь	63
Выводы	.....	76
Глава III.	Математическая модель каналов спутниковой радиосвязи	77
§ 3.1.	Ослабление сигнала спутниковой связи в свободном пространстве	77
§ 3.2.	Ослабление сигнала в атмосфере Земли	82

§ 3.3.	Ослабление сигнала спутниковой связи из-за многолучевости	91
§ 3.4.	Ослабление сигнала на радиолиниях Спутник-Земля из-за пылевых и песчаных бурь	100
§ 3.5.	Математическая модель передаточной функции радиоканалов спутниковой радиосвязи	106
Выводы	.....	112
Глава IV.	Моделирование и исследование затухания радиосигналов в каналах спутниковой связи из-за пыльных бурь	113
§ 4.1.	Влияние высоты на видимость во время песчаных и пыльных бурь	113
§ 4.2.	Влияние угла места на затухание радиосигнала из-за песчаных и пыльных бурь	125
§ 4.3.	Влияние высоты пыльной бури в Ираке на затухание радиоволн	130
§ 4.4.	Затухание радиосигнала при поднимающейся пыли и во время пылевой бури	136
§ 4.5.	Рекомендации для разработчиков линий связи	141
Выводы	.....	142
Заключение	.....	143
Список литературы	.....	145
Приложения 1	Наблюдавшиеся пыльные бури в Ираке	156
Приложения 2	Акты внедрения результатов работы	159
Приложения 3	Свидетельство о регистрации приграммы	162
Приложения 4	Текст программы	163

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

НП - Неуверенного приема

КА - Космический аппарат

ММД - Миллиметровый диапазон

ИСЗ - Искусственные спутники земли

СВЧ - СВЕРХВЫСОКИЕ частоты

КВЧ - Крайне высокие частоты

С/Ш - Соотношение сигнал / шум

ЭИИМ - Эквивалентная изотропная излучаемая мощность

СССР - Союзе Советских Социалистических республик

МСЭ-R - Международный союз электросвязи

ГСП - Глобальная система позиционирования

СОО - Средняя околоземная орбита

ССП - Спутниковые системы позиционирования

СРК - Спутникового радиоканала

СС - Спутниковой связи

ГИС - Географическая информационная система

ГНСС - Глобальных навигационных спутниковых системах

ЭМВ - Электромагнитные волны

МПЧ - Максимально применимой частотой

ЭМП - Электромагнитные пространственные

V_0 - Ссылка видимость

V - Видимость

СВ - Скорость ветра

F – Частота

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Радиосвязь, телевидение и радиовещание, осуществляемые с помощью искусственных спутников Земли, широко вошли в нашу жизнь. Организованная впервые 60 лет назад спутниковая связь активно развивалась и к настоящему времени стала ядром глобальных сетей передачи информации. С развитием спутниковой связи стали усложняться и требования к качеству передачи информации, которое во многом зависит от свойств используемых радиоканалов.

Радиоканалы от наземных станций до спутниковых ретрансляторов можно разделить на два вида - при подъеме информации на спутник и при передаче ее на Землю. С каналами подъема информационных потоков на спутники забот меньше, так как они обеспечены мощной энергетикой наземных передающих станций. А при описании радиоканалов от космического аппарата (КА) до наземных станций накопилось много проблем.

На заре рождения вычислительной техники было понятно желание наиболее простого аналитического описания интерференционных замираний в спутниковых радиоканалах. И их стали описывать релеевским законом распределения вероятностей. Это породило проблему, так как релеевские замирания по экспериментальным данным большинства исследователей наблюдаются не чаще 60% времени сеансов связи, а более глубокие замирания, например, с учено-нормальным законом распределения вероятностей оказались не учтенными. При современном развитии вычислительной техники уже можно перейти к более точному многопараметрическому описанию замираний в радиоканалах.

Другая проблема вызвана тем, что большинство экспериментальных исследований проводились в Америке и в Европе. Поэтому для регионов с сезонными ливневыми дождями потребовалась дополнительные рекомендации Международного союза электросвязи по модификации описания радиоканалов для учета непрерывного влияния гидрометеоров на распространяющиеся ра-

диосигналы. Но некоторые природные явления оказались совсем не учтенными, например пыльные бури. Пыльные бури исключительно неблагоприятное природное явление, влияющее негативно на здоровье людей и общую экологическую обстановку. Засорение атмосферы приводит к большому числу отрицательных факторов, в том числе к снижению оптической видимости и к затуханию распространяющихся в атмосфере радиоволн.

В Рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ или ITU) сказано, что влияние пыльных бурь на распространение радиосигналов пока не изучено. Цитата из рекомендаций МСЭ: "О влиянии песчаных и пылевых бурь на радиосигналы на наклонных трассах известно очень мало. Имеющиеся данные показывают, что на частотах ниже 30 ГГц только высокая концентрация частиц и/или высокая влажность могут оказать значительное влияние на распространение радиоволн".

Проблема по учету влияния на распространяющиеся радиосигналы пыльных и песчаных бурь, нередких в странах с засушливым резко континентальным климатом, например, в Ираке, пока не решена. Исследование пыльных и песчаных бурь и учет их влияния при проектировании систем спутниковой связи могут дать дополнительные возможности для повышения качества передачи информации по спутниковым радиоканалам. Это и определяет актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы. В области описания спутниковых радиоканалов сделано очень много. Известно большое количество работ ученых, еще в прошлом веке, на основе обширных экспериментальных исследований, решавших задачи корректного описания и расчета радиолиний спутниковой связи. В их числе Фортушенко А.Д., Кулк К.И., Зубарев Ю.Б., Бородич С.В., Кантор Л.Я., Ямпольский В.Г., Бродский М.В, Цейтлин М.З., Капланов М.П., Самойлов А.Г., Chepil W.S., Woodruff N.P., Musa A., Bashir S.O., Paul B.S., Ahmed A.S., Gillette D.A., Patterson E.M., Qun-Feng Dong, Li-Xin Guo, Ying- Li, Hui Zhang, Ming-Jun Wang и другие. Однако основанное на эксперименталь-

ных исследованиях описание спутниковых радиоканалов не охватывает все возможные природные явления, в том числе пыльные и песчаные бури.

В соответствии с программой ООН по окружающей среде в 2007 году была создана Система по обнаружению и предупреждению о песчаных и пыльных бурь (SDS-WAS). Система SDS-WAS имеет несколько региональных узлов:

- Северная Африка, Ближний Восток и Европа, координируются Региональным центром в Барселоне, Испания, размещенным в Государственном метеорологическом агентстве (AEMET) и Барселонским суперкомпьютерным центром (BSC);
- Азия, координируется Региональным центром в Пекине, Китай, который находится в ведении Китайской метеорологической администрации (CMA);
- Третий центр, размещен в Карибском институте метеорологии и гидрологии (CIMH) на Барбадосе.

Решению задач по изучению и прогнозу пыльных бурь помогают и государственные гидрометеорологические структуры, такие, например, как Республиканская гидрометеорологическая служба Сербии, Китайская академия метеорологических наук, Иракская метеорологическая организация, Гидрометеорологическая служба России и другие.

Растущие требования к качеству передачи информации и нерешенные пока проблемы по полному описанию спутниковых радиоканалов создают противоречие, которое и определило цель и задачи настоящего исследования.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование спутниковых радиоканалов и разработка модели влияния пыльных и песчаных бурь на спутниковую радиосвязь на основе анализа пыльных бурь, происходивших в разных провинциях Ирака в 2016 - 2020 годах.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поочередно решены следующие задачи:

- выполнен анализ радиоканалов космический аппарат – земная станция для спутников, работающих на околоземных, геостационарных и высокоэллиптических орбитах;

- исследованы особенности прохождения радиосигналов через радиационные пояса Земли, ионосферу и атмосферу;

- модифицирована математическая модель передаточной функции радиоканалов спутниковой радиосвязи для учета многопараметрической зависимости интерференционных замираний;

- исследовано влияние высоты пыльных образований и угла места антенн на затухание радиосигнала из-за песчаных и пыльных бурь;

- предложена аналитическая модель влияния пыльных и песчаных бурь на затухание сигналов спутниковой радиосвязи;

- оценено влияние пыльных бурь на передачу информации по радиолиниям КА-земные станции в различных частотных диапазонах.

Объект диссертационного исследования. Объектом исследования являются линии радиосвязи спутник - земные станции, работающие в условиях жаркого резко континентального климата.

Предмет исследования. Предметом исследования является модель влияния пыльных и песчаных бурь на затухание сигналов спутниковой радиосвязи.

Научная новизна достигнутых результатов состоит в следующем:

- предложена классификация пыльных бурь, основанная на экспериментальных данных по наблюдению этих явлений в Ираке за 2016 - 2020 годы, позволяющая дифференцировано учитывать влияние поднимающейся пыли, пылевых и песчаных бурь на радиосвязь;

- предложен критерий оптической видимости для учета влияния пыльных образований на качество передачи радиосигналов по линиям связи;

- на основе собранных в Ираке экспериментальных данных получены аналитические выражения и создана математическая модель для учета ослабления радиосигналов из-за пыльных и песчаных бурь;

- предложена инженерная методика и алгоритм расчета влияния пыльных бурь на ослабление передаточных функций радиоканалов КА- земные станции;

Практическая значимость исследования:

- определены зависимости затухания сигналов на линиях спутниковой связи КА – земная станция из-за атмосферных газов, угла места приемных антенн, наличия гидрометеоров и многолучевости;

- определено влияние высоты пыльной бури на видимость;

- найдена взаимосвязь концентрации пыли и видимости с затуханием передаточной функции радиоканалов КА- земные станции;

- предложена математическая модель передаточной функции линий спутниковой связи с Землей, объединяющая возможные потери энергопотенциала при передаче информации по таким линиям связи;

- предложены рекомендации по предотвращению длительных перерывов связи во время пыльных бурь при видимости менее 5 метров, заключающиеся в необходимости добавления энергетике от 3 до 7 дБ путем подключения резервных приемных комплексов и использования алгоритмов сложения разнесенных сигналов.

- практическая значимость и полезность полученных результатов подтверждается актом внедрения результатов работы при разработке линий связи "Иракской службой по метеорологии и сейсмологии".

Методологические и теоретические основы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы статистической теории связи, теории передачи дискретных сообщений, теории вероятностей и математической статистики, методы численного моделирования с помощью МАТЛАБ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Затухание сигналов на линии связи спутник-Земля увеличивается при уменьшении видимости во время поднимающейся пыли и пыльных бурь.
2. Рост частоты приводит к увеличению общего затухания, в том числе и затухания из-за пыльных бурь.
3. При уменьшении угла места антенн затухание растет при той же высоте пыльной бури..
4. С увеличением высоты пыльных бурь величина затухания растет нелинейно.
5. Затухание сигналов в пыльных бурях растет экспоненциально при уменьшении видимости меньше 10 метров. Например, на частотах Ka диапазона при видимости 5 метров затухание превышает 6,4 дБ, что может приводить к длительной потере связи.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Исследование основано на многолетних экспериментальных данных, полученных в различных регионах Ирака в 2016-2020 годах. Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами моделирования, публикациями результатов в известных рецензируемых журналах, не противоречием с результатами других исследователей, а также обсуждением на конференциях и семинарах. Достоверность подтверждается внедрением результатов в Ираке и в России, что подтверждается соответствующими актами.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии", Владимир; "Systems of signals generating and processing in the field of on board communications", Moscow; "Физика, техника и технологии сложных систем", Ярославль;" International Scientific Conference "CAMSTech-2020", "Advanced Technologies in Aerospace", "Engineering and Automation", Krasnoyarsk; IEEE № 51389, Moscow; "Проблемы эффективности и

безопасности функционирования сложных технических и информационных систем", Серпухов; "Перспективные технологии в средствах передачи информации", Владимир.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них: 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 6 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 8 - в материалах научных конференций.

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 4, 10 и 14 паспорта специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты выполненного исследования получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, автор лично ставил и решал задачи, проводил анализ литературы, выполнял имитационное моделирование и обобщал полученные результаты.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка литературы из 110 источников и 4 приложений. Общий объем диссертационной работы 169 страниц, из них основного текста 154 страницы, в том числе рисунков 61, таблиц 11.

ГЛАВА I. СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ И ИХ РАДИОКАНАЛЫ

§ 1.1. Системы спутниковой радиосвязи

Спутниковые технологии развиваются быстрыми темпами, и их применение постоянно растет. Спутники используются не только для радиосвязи, но и для астрономии, прогнозирования погоды, радиовещания, картографии и многих других приложений.

На орбите Земли находится более 2500 действующих спутников, которые используются как частными, так и государственными организациями. Многие из них находятся на геостационарной орбите в экваториальной плоскости почти на 40 000 км выше экватора и спутник кажется неподвижным в одной и той же точке неба.

Приполярные районы получают слабый уровень сигнала от спутников, размещенных на геостационарной орбите, как показано на рис. 1.1 и практически не принимают сигналы геостационарных спутников. Близко к полярным районам находится зона неуверенного приема (НП) в которой прием сигналов геостационарных спутников сопровождается частыми сбоями.

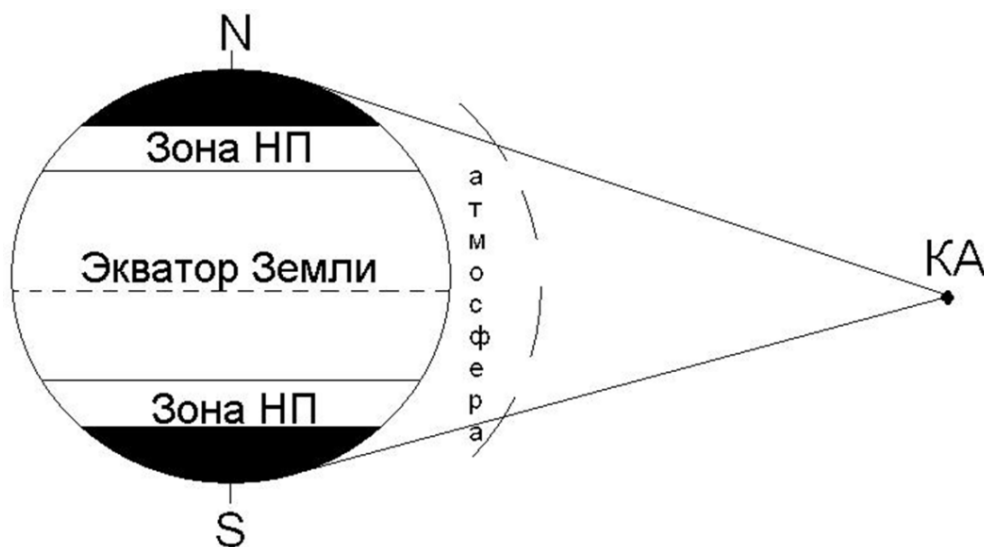


Рисунок 1.1. Освещение поверхности Земли с геостационарной орбиты

Эллиптические орбиты космических аппаратов (КА) позволяют освещать полярные и южные районы, значительно удаленные от экватора, как показано на рис 1.2.

Спутники связи используют широкий диапазон радиочастот. Чтобы избежать взаимных помех Международный союз электросвязи разработал регламент, в соответствии с которым полосы частот и частотные диапазоны распределены между различными службами. Такое распределение полос минимизирует риск возникновения взаимных помех

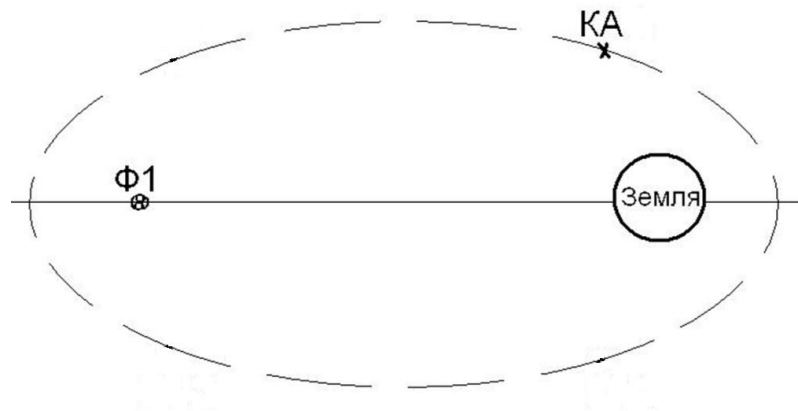


Рисунок 1.2: Эллиптические орбиты космических аппаратов

Частоты, на которых происходит передача от земной станции к спутнику, отличаются от частот, используемых для передачи от спутника к земной станции (обычно первые выше). Частоты, используемые в спутниковой связи, разделяют на диапазоны, обозначаемые буквами, как показано [1] в таблице 1.1.

Таблица 1.1: Частотные диапазоны

Диапазоны	L	S	C	X	Ku	K	Ka
Частоты, ГГц	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	18-26	26-40

Обозначения диапазонов стандартизованы Международным союзом электросвязи и были названы так, чтобы на них было легко ссылаться. На более высоких частотах пользователям выделены и более широкие полосы частот. Из-за возросшего использования спутников, их количества и роста трафика, перегрузка стала серьезной проблемой в частотных диапазонах L, S, C. В настоящее время исследуются новые технологии, позволяющие использовать более высокочастотные диапазоны, в том числе и частоты выше частот диапазона Ka. Выбор частот для передачи данных от земной станции к спутнику и от спутника к земной станции даже в разрешенном диапазоне не является произвольным. От частоты зависит, например, поглощение радиоволн в атмосфере, а также необходимые размеры и вес антенных устройств и самой аппаратуры.

Загруженность частотных диапазонов от L до X заставляет осваивать все более высокочастотные участки спектра. Конечно, в спутниковой радиосвязи встречается много трудностей. В первую очередь они вызваны сильным затуханием миллиметровых волн при их распространении. Даже при распространении в свободном пространстве затухание напряженности поля велико и определяется выражением [2].

$$B = 20 \lg \left(\frac{4\pi Rf}{C} \right), \quad (1.1)$$

где: R - расстояние между передатчиком и приемником (м), C - скорость света (м/с), f - частота несущей (Гц).

Например, для глобальных систем позиционирования, расположенных на расстоянии от Земли примерно на 20000 км, на частоте 1,6 ГГц затухание сигнала в свободном пространстве составит

$$B = 20 \lg(4 * 3,14 * 2 * 10^7 * 1,6 * 10^9 / (3 * 10^8)) = 180 \text{ дБ.}$$

Но этим затуханием сигнала сложности не ограничиваются. К ослаблению сигналов, определяемого выражением (1.1), добавляется ослабление в газах атмосферы, которое не превышает 1 дБ. А вот дожди, снег, туман и другие гидрометеоры очень сильно ослабляют распространение радиоволн, особенно миллиметрового диапазона [3].

В тропосфере и стратосфере Земли радиоволны теряют свою энергию в основном за счет потерь в газах атмосферы и из-за поглощения, затухания и рассеяния в облаках, затухания из-за дождей, снега, града, туманов и др. гидрометеоров [3]. Кислород и водяной пар в нижней части атмосферы (с высотами до 20 км), называемой тропосферой, существенно влияют на затухание сигналов на частотах выше 3 ГГц. Сильное негативное влияние на распространение радиоволн оказывают молекулы воды. Плотность водяного пара (ρ) можно рассчитать на основе одновременных измерений температуры и относительной влажности с использованием выражения [4]:

$$\rho = (U/5.752) [\theta^6 \cdot 10^{(10-9.834\theta)}] \quad (1.2)$$

где: U - относительная влажность воздуха в процентах, θ - величина, зависящая от измеренной температуры T_0 воздуха, равная $\theta = 300 / T_0$

Верхняя часть атмосферы называется ионосферой и она также накладывает серьезные ограничения на спутниковую связь. Ионосфера это слой атмосферы, сильно ионизированный космическими лучами, который обычно состоит из трех областей, которые называют слоями:

- Слой Д, расположенный на высоте от 60 до 90 км слабо ионизирован. Причина его ионизации сгорающие на этих высотах метеориты, жесткое рентгеновское излучение Солнца и высокоскоростные частицы из космоса, заносимые магнитными бурями.

- Слой E (слой Кеннелли - Хевисайда), наблюдающийся на высотах от 90 до 130 км, обладает высокой концентрацией зарядов и сильно отражает средние и даже короткие радиоволны.

- Слой F, расположенный на высотах более 130 км и занимающий всю остальную ионосферу, который стабильно отражает радиоволны частотой от нескольких мегагерц до 30 МГц, что обеспечивает передачу радиосигналов коротковолнового диапазона на значительные расстояния. Слой F подразделяется на слои F1 и F2. Слой F1 является нижней частью слоя F и существует на высоте до 200 км над поверхностью Земли, тогда как слой F2 является верхней частью и существует на высоте от 200 до 500 км. Слой F2 успешно отражает высокочастотные волны (3-30 МГц) круглосуточно, хотя ионизация значительно меняется в зависимости от солнечной активности.

Радиоволны, распространяющиеся через ионосферу, испытывают различные механизмы ослабления, такие как поглощение, отражение, преломление, рассеяние, изменение поляризации, групповую задержку и сцинтилляции (вспышки люминесценции).

До высоты ориентировочно в 1000 км преобладают лёгкие ионы кислорода, а ещё выше ионы водорода (протоны) и в незначительном количестве ионы гелия. Реально космос начинается с высоты в 80 км от поверхности Земли. Именно на этой высоте метеориты начинают светиться в ночном небе. Хотя физиологи считают, что эквивалент космосу начинается уже с 20 км, так как на высоте 16 км давление воздуха всего 47 миллиметров ртутного столба (на уровне моря оно равно 760 мм рт. ст.), что соответствует давлению паров жидкостей в тканях человека и вызывает вскипание жидкостей в тканях.

Про прохождении радиоволн через атмосферу Земли наблюдается сильное поглощение сигналов газами атмосферы, молекулами кислорода и парами воды. На рис. 1.3 показан график погонного ослабления радиосигналов от 300 МГц до терагерцового диапазона частот (частоты $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{12}$ Гц) на расстоянии в 1 км [5].

Загруженность частотных диапазонов от L до X заставляет осваивать все более высокочастотные участки спектра, вплоть до миллиметрового диапазона (ММД) частот. Способствует освоению ММД и то, что основные свойства миллиметровых волн к настоящему времени изучены достаточно подробно [3].

Как показано на рис. 1.3, полоса сильного поглощения (на расстоянии всего в 1 км) возникает на частотах около 60 ГГц и обусловлена поглощением в молекулах кислорода воздуха (O_2), а другие полосы затухания на частотах около 180 и 330 ГГц возникают из-за поглощения радиоволн молекулами водяного пара (H_2O). Частотные диапазоны между этими полосами поглощения доступны для практической связи со спутниками, хотя каждый километр трассы через атмосферу Земли ослабляет радиосигналы на несколько децибел.

Кислород атмосферы интенсивно ослабляет радиосигналы, особенно на частотах около 60 и 120 ГГц. Другие газы, наполняющие атмосферу вызывают незначительное ослабление радиосигналов.

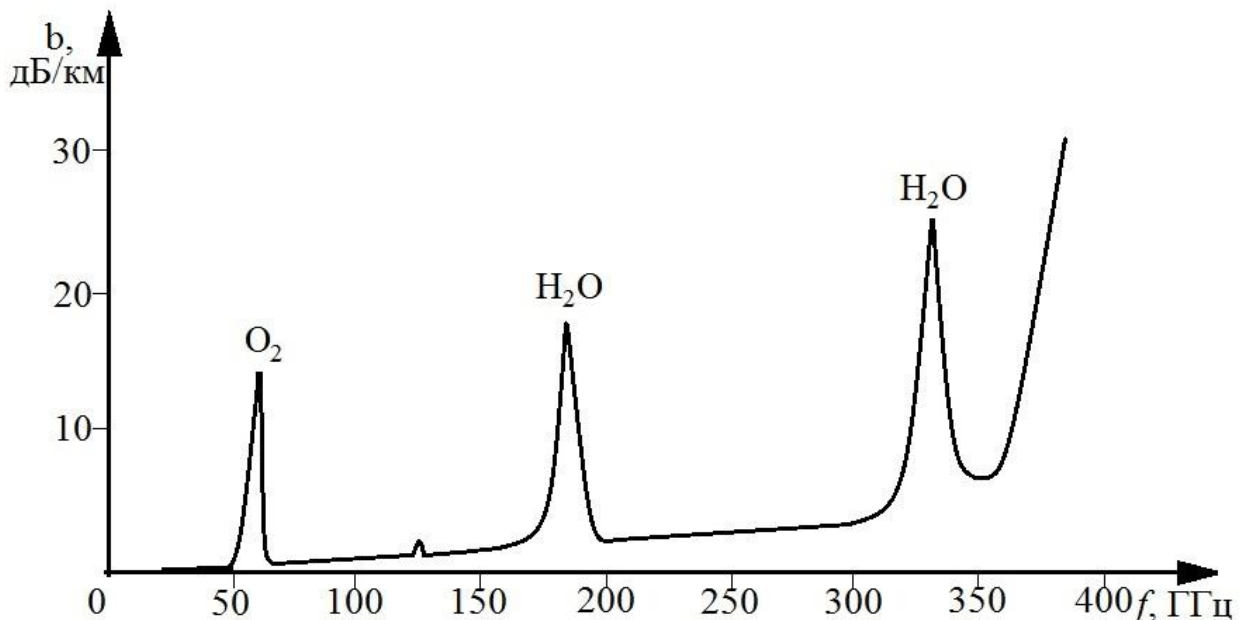


Рис. 1.3. Зависимость поглощения радиосигналов кислородом и парами воды

Уровень поглощения зависит от концентрации водяного пара, давления, температуры, угла направления на спутник [2]. Выявленная исследователями экспериментальная зависимость дала возможность определить зоны

наилучшего распространения сигналов миллиметрового диапазона частот (ММД) через атмосферу, так называемые «окна прозрачности» атмосферы при длинах волн 3 мм и 8 мм, и определять запас по энергетике для линий радиорелейной связи.

Этот график применим для систем наземной радиосвязи, но для радиолиний со спутниками он требует коррекции, поскольку плотность молекул как кислорода, так и воды непостоянна и зависит от высоты и даже меняется во времени, то есть не стационарна.

После открытия эры космоса, осуществленной СССР в 1957 году, и запуска СССР в 1957-1958 гг. целого ряда спутников с научными целями, в США попытались использовать космос для радиосвязи. 18 декабря 1958 года США запустили первый спутник ретранслятор, который провел на орбите всего 34 дня, выдержав 78 сеансов передачи речи [6], но с этой даты началось активное освоение радиосвязи с помощью спутников-ретрансляторов.

Первые советские искусственные спутники земли (ИСЗ) типа Молния были запущены на вытянутую эллиптическую орбиту с высотами в апогее 40000 км и 500 км в перигее. 4 спутника на одной орбите, каждый из которых обеспечивал в сутки 8 часовые сеансы связи, работая на частотах 800-1000 МГц дали возможность связи столицы СССР с Дальним Востоком и Крайним Севером. Спутники Молния транслировали одну телевизионную программу и обеспечивали дуплексную многоканальную связь. На базе спутников Молния была организована первая сеть приемных станций Орбита и линия прямой правительственной связи Москва-Вашингтон.

Первый геостационарный спутник Syncom-3 был запущен в США. Первые спутники СССР на геостационарной орбите были спутники типа Горизонт, занявшие 10 точек на геостационарной орбите и имеющие по 8 ретрансляторов: из них 6 работающих на частотах 6/4 ГГц, 1 на частотах 14/11 ГГц и один на частотах 1,6/1,5 ГГц. Спутники Горизонт позволили организовать целый ряд сетей связи и телевизионного вещания, таких как Орбита-2, Москва,

Орбита - РВ, Океан, Москва-Глобальная и другие. Всего было запущено 45 спутников типа Горизонт, а в 1999 году их заменили на новые спутники серии Экспресс с большим числом ретрансляторов.

Серия ИСЗ Экспресс непрерывно совершенствуется и к настоящему времени основная российская геостационарная группировка оснащена спутниками Экспресс-АМ (внешний вид спутника показан на рис. 1.4) в среднем с 70 транспондерами на борту каждого, работающими во всех частотных диапазонах от L до Ka. Кроме этой группировки на геостационарной орбите работают серии спутников Ямал, Благовест, Луч, Галс и целый ряд зарубежных спутников, таких как Intelsat, Inmarsat, ChinaSat, Galaxy, Americom и другие.



Рис. 1.4. Вид на спутник Экспресс-АМ6

Спутниковая связь конечно не ограничивается геостационарной орбитой. Давно освоены негеостационарные орбиты, которые эффективно используются для навигации (спутниковые группировки ГЛОНАСС, GPS, Галилео, Бейдоу, работающие на высотах от 18 тыс. км до 24 тыс.км), для персональной и сотовой спутниковой связи (группировка спутников Гонец на высоте 1400 км. с диаметром зоны покрытия от одного спутника в 5000 км., группировка спутников Иридиум на высоте около 800 км., группировки спутников Globastar, Скиф, Метеор, разведывательные группировки спутников США Sa-

mos-F, GRAB, Rhyolite и другие). Внешний вид легкого (вес 280 кг.) спутника группировки Гонец показан на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Спутник персональной связи типа Гонец

К 2000 году было запущено более 3000 спутников низколетов на орбитах от 200 до 35000 км которые широко используются для обеспечения связи. Использование круговых орбит позволяет решать важные задачи по мониторингу климата Земли, картографии, подвижной связи, навигации, разведки и т.д. На рис. 1.6 показан внешний вид абонентского терминала для подвижной радиосвязи с помощью низколетящих спутников.



Рис. 1.6. Абонентский терминал Гонец для диапазона 300-400 МГц

У низколетящих спутников очень широкий реестр применения. Например спутники Гонец предназначены для:

- передачи координатно-временной информации навигационной системы ГЛОНАСС;
- связи в удалённых регионах;
- мониторинга транспорта;
- мониторинга нефти и газопроводов, а также промышленных объектов;
- связи в зоне бедствий;
- связи в интересах различных ведомств и министерств.

В свою очередь, использование высоких орбит позволяет покрывать сигналом любую точку земной поверхности, что особенно важно для передачи сигналов в высокие и полярные широты, куда не достают сигналы геостационарных спутников, как показано на рис. 1.1. Это особенно важно для России, значительная часть территории которой находится в Заполярье. Поэтому активно используются российские спутники, работающие на высокоэллиптических орбитах, такие группировки как Молния, заменяющая ее группировка спутников Меридиан, группировка спутников Тундра с высотой полета в апогее до 52 тыс.км. Это выше чем у спутников Молния и спутники Тундра летают с одним оборотом за звездные сутки (23ч 56 мин), то есть дольше находятся в зоне приема наземных станций. Это обеспечено большей мощностью бортовых радиопередающих устройств.

Высокоэллиптические спутники обеспечивают телевизионным вещанием, радиовещанием и бесперебойной связью [7] районы, расположенные в северных и южных широтах, удаленных от экватора, а также работают в системах национальной обороны и защиты (например, российская группировка спутников Око, американские высокоорбитальные группировки Jumpseat и Trumpet [8,9]).

§ 1.2. Радиоканалы спутниковых геостационарных ретрансляционных систем

Радиоканалы с геостационарными ретрансляторами имеют свои особенности, вызванные неподвижным положением спутника относительно Земли. К таким особенностям можно отнести значительное, но стабильное время распространения радиосигнала от спутника до Земли, что позволяет использовать временную избыточность [10] и применять пакетные режимы работы в общей полосе частот. Особенностью радиоканалов с геостационарными космическими аппаратами (КА) является также зависимость характеристик радиоканала от местоположения абонента на Земле. Когда КА находится в зените над абонентом, условия распространения радиоволн одни, а когда угол места у абонента мал, как показано на рис. 1.7, растет задержка радиосигнала, кроссполяризация из-за гидрометеоров, увеличивается затухание радиосигнала, из-за рассеяния волн на неоднородностях атмосферы появляются замирания сигнала.

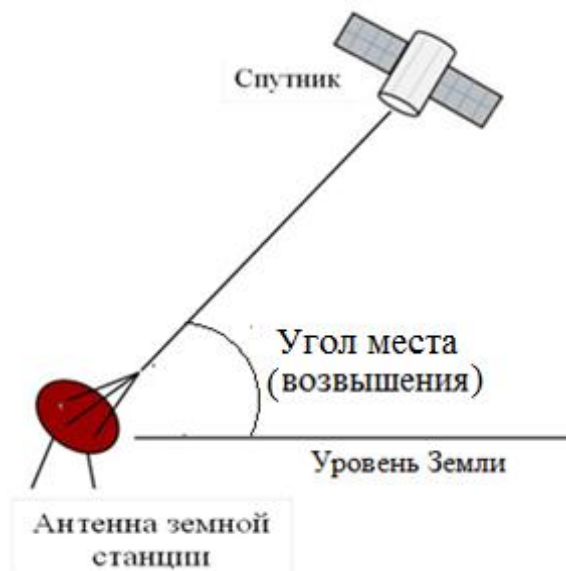


Рис. 1.7. Угол места (возвышения) антенны

Поскольку радиоканал с геостационарными ретрансляционными КА при малых углах места может проходить через несколько различных климатических зон, то возникают условия для аномального распространения радио-

волн с частичным закрытием трассы, экранированием, многолучевостью, тропосферным рассеянием и замираниями.

Радиоканалы спутниковых ретрансляционных систем имеют целый ряд различных характеристик и свойств, но главная особенность радиоканала заключается в том, что во время распространения радиоволны подвергаются рассеянию, поглощению, затуханию в облаках и дождях ближе к поверхности Земли, а также поглощению, отражению, преломлению, рассеянию, поляризации, групповой задержке и затуханию сцинтилляции в области ионосферы.

Дождь считается основной причиной затухания на частотах в диапазонах от 5 до 300 ГГц сверхвысоких частот (СВЧ). Уровень спутникового сигнала уменьшается в условиях дождя; в частности, радиоволны выше 5-10 ГГц подвергаются ослаблению молекулярным поглощением кислорода и воды [11]. Наличие дождевых капель может серьезно ухудшить надежность и работоспособность линий связи. Затухание из-за дождя и других гидрометеоров (туман, мокрый снег, град, изморось и др.) является функцией различных параметров, включая угол места, как показано на рисунке 1.7, несущую частоту, долготу и широту земной станции и скорость выпадения гидрометеоров, то есть интенсивность осадков.

Однако основными параметрами являются распределение капель по размерам и количество капель, которые присутствуют в объеме, разделяемом волной с дождем. Важно отметить, что затухание определяется не количеством выпавшего дождя, а скоростью его выпадения [12].

К настоящему времени большинство негативных явлений, связанных с распространением радиоволн СВЧ, практически исследованы, что позволяет определять необходимый энергетический потенциал для их преодоления. Например, ослабление в дождях можно описать следующим выражением [13]

$$B_d = \left(\frac{f}{70}\right)^2 Y, \quad [\text{дБ/км}] \quad (1.3)$$

где: Y - интенсивность дождя [мм/ч], f - несущая частота в [ГГц].

На основе модели специфического ослабления, предложенной рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ-R P.837-5, МСЭ-R P.836-4, МСЭ-R P.2001-1) установлено, что Y зависит только от скорости выпадения осадков, измеряемой в миллиметрах в час [14-16]. Ослабление из-за дождя является ключевым ограничивающим фактором при использовании высокочастотных диапазонов в спутниковых и наземных микроволновых системах. Капли дождя поглощают и рассеивают энергию радиоволн. Высокая интенсивность осадков может привести к полному отключению связи. Если размер капель дождя в диаметре приближается к половине длины волны сигнала, сигнал будет сильно ослаблен. Поэтому более высокие частоты ослабляются больше чем низкие частоты из-за меньшей длины волны.

Облака также являются источником затухания на более высоких частотах. Из-за разнообразной природы облаков может происходить затухание различной интенсивности. Каждый тип облака имеет различную концентрацию капель воды. Облака, имеющие кристаллы льда, вызывают меньшее затухание. Не осаждающиеся облака также дают не очень значительное ослабление радиоволн, поскольку содержание жидкости слишком мало, чтобы вызвать большое поглощение энергии, а капли слишком малы, чтобы рассеять энергию, а также как правило они сферические, поэтому не могут вызвать перекрестную поляризацию. В теплом климате облака толще, поэтому затухание из-за облаков может быть выше.

Дождь ухудшает работу системы спутниковой связи, увеличивая шумовую температуру антенны земной станции. Во время дождя возникает тепловое излучение от капель дождя, которое вызывает увеличение общей температуры шума. Антенна собирает шумы от Земли, от атмосферы (будь то облако или дождь) и от внеземных источников. Температура шума антенны зависит от угла возвышения, размера антенны, частоты и погодных условий. При дожде на линиях связи геостационарных космических аппаратов (КА) с наземными

станциями наблюдается резкое снижение мощности радиосигналов на входе радиоприемников.

Радиоканалы геостационарных КА имеют большую протяженность, что вызывает сильное ослабление сигнала, называемое затуханием в свободном пространстве и описываемое выражением [1].

$$L_{FS} = 20 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \text{ дБ}, \quad (1.4)$$

где: L_{FS} - потери передачи радиосигнала в свободном пространстве,

R - расстояние линии связи, λ - длина волны.

Поэтому радиоканалы спутниковой связи в отличие от других каналов связи рассматриваются как каналы с большим затуханием [16].

Большое затухание в радиоканалах приводит к тому, что уровень сигнала на входе радиоприемника соизмерим с уровнем флуктуационных токов радиоприемника, что затрудняет обнаружение принимаемых сигналов и их отделение от помех. Уменьшить затухание радиоканала можно разными способами, в том числе за счет выбора оптимальных рабочих частот, а также за счет более направленных и эффективных передающих и приемных антенных устройств.

Отношение сигнал / шум (С/Ш) на входе приемника зависит от характеристик передатчика, среды передачи и свойств приемника. Отношение С/Ш может быть определено разными способами:

- Первый тип (теоретическое отношение С/Ш).
- Второй тип (практическое соотношение С/Ш).

Первый тип (теоретический С/Ш): мощность, излучаемая на единицу телесного угла изотропной антенной, питаемой от радиочастотного источника питания P_T , задается формулой:

$$P_T / 4\pi \text{ пв}, [\text{Ватт} / \text{стерадиан}]. \quad (1.5)$$

В направлении максимума диаграммы направленности антенны, где значение коэффициента усиления передачи равно G_T , любая антенна излучает мощность на единицу телесного угла, равную:

$$G_T P_T / 4\pi, \text{ [Ватт / стерadian]}. \quad (1.6)$$

Величина $G_T P_T$ называется эквивалентной изотропной излучаемой мощностью (ЭИИМ), и она выражается в ваттах.

Приемная антенна с эффективной площадью (A), расположенная на расстоянии (R) от передающей антенны, получает мощность, равную:

$$P_R = \left(P_T G_T / 4\pi \right) \left(A / R^2 \right) = \emptyset A, \text{ [Вт]}, \quad (1.7)$$

где величина $\emptyset = \left(P_T G_T / 4\pi R^2 \right)$ называется плотностью потока мощности и она выражается в [Вт/м²].

Эквивалентная площадь антенны выражается как функция ее коэффициента усиления (G_R) выражением:

$$A = G_R / \left(4\pi / \lambda^2 \right) \text{ в (м}^2\text{)} \quad (1.8)$$

Следовательно, мощность, поступающая на приемную антенну определяется формулой:

$$P_R = \emptyset A = \left(P_T G_T / 4\pi R^2 \right) \left(\lambda^2 G_R / 4\pi \right) = (P_T G_T) \left(\lambda / 4\pi R \right)^2 G_R \text{ [Вт]} \quad (1.9)$$

Или
$$P_R = (P_T G_T) \left(1 / L_{FS} \right) G_R, \quad (1.10)$$

где: $L_{FS} = \left(4\pi R / \lambda \right)^2$ потери в свободном пространстве.

Отношение сигнал / шум позволяет определить величину принимаемого сигнала относительно шума, присутствующего на входе приемника. Используют несколько соотношений для определения этой относительной величины:

1. Отношение мощности сигнала к мощности шума, так как сравниваются две величины одного и того же рода (С/Ш).

2. Отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума, это записывается как С/Ш, (Гц). Преимущество такой записи С/Ш заключается в том, что подразумевается знание эквивалентной полосы пропускания шума приемника, которая определяется в соответствии с полосой пропускания, занимаемой модулированной несущей.

3. Отношение мощности сигнала к температуре шума ($T_{ш}$), это отношение получается из С/Ш путем умножения на постоянную Больцмана ($k = 1.38 * 10^{-23}$). Такое отношение записывается как С/Ш, Вт/К.

Соотношение С/Ш соответствует наиболее распространенной практике. Мощность сигнала, поступающего на вход приемника, задается формулой (10), следовательно:

$$C = P_R \quad (1.11)$$

Спектральная плотность шума в этой же точке равна:

$$N_0 = kT_N \quad (1.12)$$

где: N_0 – шум, T_N -температура шума.

И уравнение (10) становится:

$$\frac{C}{N_0} = (P_T G_T) \left(\frac{1}{L_{FS}} \right) \left(\frac{G_R}{T_N} \right) \left(\frac{1}{k} \right) \quad (1.13)$$

где: C/N_0 - спектральная плотность отношения мощности сигнала к шуму, $(P_T G_T)$ - эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) передатчика, $(1/L)$ - потери в среде передачи, (G_R/T_N) - коэффициент полезного действия приемника, k -постоянная Больцмана.

Выражение (1.13) для (C/N_0) содержит пять факторов:

1. Отношение (C/N_0) нуждается в модификации, так как $C = P_R$.

2. ЭИИМ характеризует мощность передатчика и усиление антенны.
3. $1/L$ характеризует потери в свободном пространстве.
4. G_R/T_N характеризует приемное оборудование. Это отношение называется цифрой качества приемного оборудования.
5. k - постоянная величина.

Уравнение (1.13) не дает реального значения отношения (C/N_0) , поскольку на практике необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющих на реальное значение отношения (C/N_0) . Например, существует максимальная C/N_0 , минимальная C/N_0 , а также могут быть многие дополнительные потери из-за рассеяния радиоволн и замираний.

Второй тип (практическое соотношение C/N_0):

На практике необходимо учитывать дополнительные факторы.

1. Максимальный коэффициент усиления антенны.

Коэффициент усиления максимален в направлении максимального излучения (электромагнитная ось антенны) и имеет значение, задаваемое выражением:

$$G_{Rmax} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) A \quad (1.14)$$

Для рефлекторной параболической антенны:

$$A_p = \pi R^2 = \pi (D/2)^2 = \pi D^2/4 \quad (1.15)$$

где: A_p - физическая площадь, D - диаметр отражательной антенны.

$$A = \eta A_p, \quad (1.16)$$

где: η - это эффективность антенны.

Следователь-

$$\text{но: } G_{R\max} = \left(4\pi/\lambda^2\right)A = \left(4\pi/\lambda^2\right)\eta A_p = \left(4\pi/\lambda^2\right)\eta\left(\pi D^2/4\right) = \eta\left(\pi D/\lambda\right)^2$$

(1.17)

Тогда уравнение (1.13) становится:

$$\frac{C}{N_0} = (P_T G_{T\max}) \left(1/L_{FS}\right) \left(\eta\left(\pi D/\lambda\right)^2 / T_N\right) \left(1/k\right) \quad (1.18)$$

2. Потери в передающем и приемном оборудовании.

Существуют потери в антенно-фидерном оборудовании. Первый тип потерь в фидере передатчика и второй тип потерь в фидере приемника, как показано на рисунке 1.8.

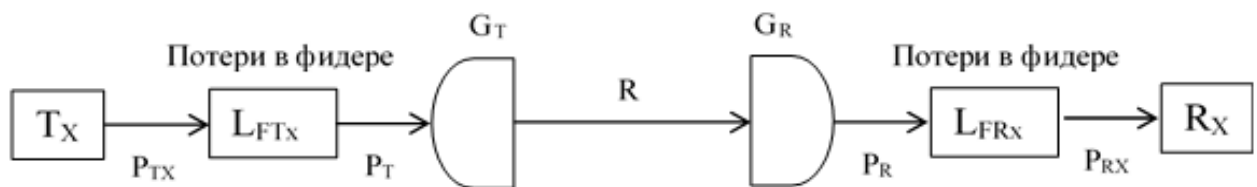


Рис. 1.8. Потери в антенно-фидерном оборудовании

Потери L_{FTx} между передатчиком и антенной при питании антенны мощностью (P_T). Необходимо обеспечить мощность (P_{Tx}) на выходе усилителя передачи таким образом, чтобы:

$$P_{Tx} = L_{FTx} \cdot P_T, \quad \text{и} \quad P_T = P_{Tx} / L_{FTx} \quad (1.19)$$

Есть и потери L_{FRx} между антенной и приемником, поэтому суммарные потери будут

$$L = L_{FS} L_{FTx} L_{FRx} \quad (1.20)$$

Подставляя уравнения (1.19) и (1.20) в (1.13) получим

$$\frac{P_{Rx}}{N_0} = \left(P_{Tx} G_{Tmax} G_{Rmax} / L \right) \left(1/T_N \right) \left(1/k \right).$$

Если мы снова поставим $C = P_{Rx}$, то:

$$\frac{C}{N_0} = \left(P_{Tx} G_{Tmax} G_{Rmax} / L T_N \right) \left(1/k \right) \quad (1.21)$$

3. Потери из-за несовершенной центровки антенны:

Геометрия звена связи для случая несовершенного совмещения передающей и приемной антенн показана на рисунке 1.9.

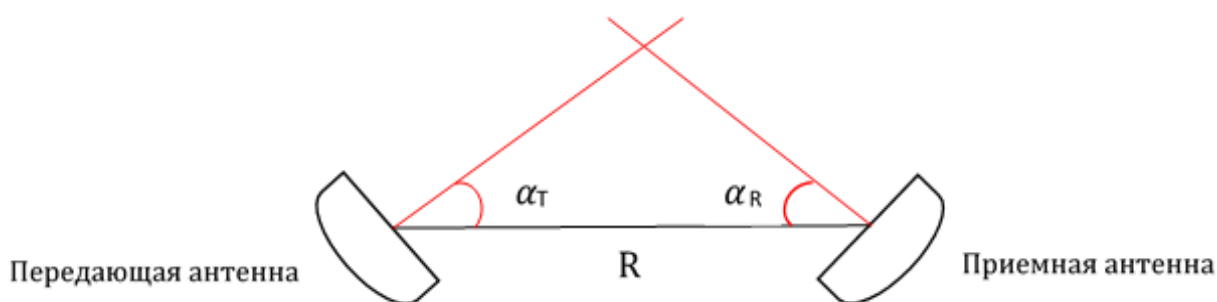


Рис. 1.9. Геометрия линии связи при несовершенной юстировке антенн

Результатом несовпадения осей антенн является потеря усиления, которая может быть выражена в уравнении (1.21) в виде потери несоосности (L_T) при передаче и потери несоосности (L_R) при приеме.

$$L_T = 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{3dB}} \right)^2, \text{ [дБ]} \quad (1.22)$$

$$L_R = 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{3dB}} \right)^2, \text{ [дБ]} \quad (1.23)$$

где: α_T и α_R - углы не соосности антенн передачи и приема, θ_{3dB} - апертура приемного луча.

Затем подставляя (1.22) и (1.23) в (1.21), получим

$$\frac{c}{N_0} = \left(P_{Tx} G_{Tmax} G_{Rmax} / L_{TN} \right) \left(1 / L_T L_R \right) \left(1 / K \right) \quad (1.24)$$

4. Потери из-за рассогласования поляризации в приемной антенне:

Также необходимо учитывать потери поляризационного рассогласования (L_{Pol}), наблюдаемые при отсутствии ориентации приемной антенны на поляризацию принимаемой волны. Учитывая (L_{Pol}), то уравнение (1.24) становится:

$$\frac{c}{N_0} = \left(P_{Tx} G_{Tmax} G_{Rmax} / L_{TN} \right) \left(1 / L_T L_R L_{Pol} \right) \left(1 / K \right) \quad (1.25)$$

5. Потери среды передачи.

Существует много потерь в среде передачи или потери на пути распространения сигнала. Сначала нужно найти эти потери, а затем подставить их в уравнение (1.25).

- Потери в свободном пространстве. Эти потери представляют собой соотношение полученных и переданных мощностей. Это соотношение зависит от частоты приема и от расстояния на линии спутниковой связи и задается следующей формулой:

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (1.26)$$

- Затухание в атмосфере.

Затухание волн в атмосфере, обозначаемой L_A , обусловлено присутствием газообразных компонентов в тропосфере и ионосфере, после чего суммарные потери L становятся:

$$L = L_{FS} L_A \quad (1.27)$$

- Затухание из-за дождя.

Величина затухания из-за дождя L_{Rain} задается произведением удельного затухания на километре трассы связи (Y_R в дБ/км) и эффективной длины пути волны в дожде L_e в [км], т. е.

$$L_{Rain} = Y_R L_e \quad (\text{дБ}) \quad (1.28)$$

С их учетом суммарные потери будут:

$$L = L_{FS} L_A L_{Rain} \quad (1.29)$$

- Затухание в песчаных бурях.

Затухание в песчаных бурях L_{Sand} (в дБ), обратно пропорционально оптической видимости и сильно зависит от влажности пылевых частиц. С учетом затухания в песчаных бурях потери (1.29) становятся:

$$L = L_{FS} L_A L_{Rain} L_{Sand} \quad (1.30)$$

- Потери из-за преломления в слоях.

Тропосфера и ионосфера имеют разные показатели преломления. Эффект преломления состоит в том, что вызывает искривление траектории волны, изменение скорости волны и, следовательно, времени ее распространения.

Изменение показателя преломления и сцинтилляция (вспышки люминесценции, возникающие под действием ионизирующих излучений в ионосфере), вызывают изменения угла прихода, амплитуды и фазы передаваемой волны, то есть замирания. Эти причины вызывают дополнительное ослабление сигнала, обозначим его L_{Ref} и тогда уравнение (30) становится:

$$L = L_T L_R L_{Po1} L_{FS} L_A L_{Rain} L_{Sand} L_{Ref} \quad (1.31)$$

Для радиоканалов с геостационарными КА потери в среде передачи и ослабление сигнала могут существенно увеличиваться в зависимости от угла места (рис. 1.7), так как возникают дополнительные потери из-за экранирования земной поверхностью и местными предметами, затухания вследствие многолучевости и замираний, а также кроссполяризации, что приводит к дополнительным потерям L_S и уравнение (1.31) становится

$$L = L_T L_R L_{Po1} L_{FS} L_A L_{Rain} L_{Sand} L_{Ref} L_S \quad (1.32)$$

С учетом (1.32) уравнение (1.25) становится:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_{Tx} G_{Tmax} G_{Rmax}}{L_T L_R L_{Po1} L_{FS} L_A L_{Rain} L_{Sand} L_{Ref} L_S} \cdot \left(1 / T_N k \right) \quad (1.33)$$

Свойством радиоканалов низкоорбитальной спутниковой связи является изменение затухания во времени, поэтому радиоканал принято считать каналом связи с переменными параметрами. Изменение затухания радиоканала может происходить по различным причинам. На величину затухания в радиоканале влияют изменения взаимного расположения радиостанций и расстояний между ними из-за быстрой скорости низкоорбитальных КА. Изменение

расстояния между работающими радиостанциями приводит к изменению мощности радиосигнала в точке приёма. Очевидно, что эти изменения особенно сильно влияют на обеспечение радиосвязи между подвижными объектами. Но даже в случаях, когда расстояние между работающими радиостанциями остаётся постоянным, а изменяется только их взаимное расположение, могут происходить достаточно резкие изменения затухания в радиоканале, вызываемые изменениями параметров среды распространения, а, следовательно, и её поглощающих свойств. Переменчивая активность Солнца приводят к изменению состояния тропосферы и ионосферы во времени. Всё это приводит к изменению величины затухания радиоканала во времени.

Также другим свойством радиоканала является его общедоступность, т.е. возможность использования одной и той же среды распространения любыми радиотехническими устройствами. Общедоступность среды распространения обеспечивает возможность одновременного функционирования большого количества линий радиосвязи. Таким образом, на входе приёмного устройства всегда кроме принимаемого радиосигнала будут присутствовать помехи от других радиостанций, которые искажают его, следовательно, и первичный сигнал, непосредственно отображающих переданное сообщение. Степень искажения первичную сигнала определяет правильность принятого сообщения, т.е. его достоверность.

Для повышения надёжности радиосвязи и обеспечения высокой достоверности принятого сообщения принимают комплекс мер, среди которых:

- осуществляют радиосвязь на оптимально выбранных частотах, свободных от помех;
- используют такие виды радиосигналов, которые обеспечивают требуемую надёжность радиосвязи при возможно меньших значениях степени превышения сигнала над помехой;
- применяют направленные передающие и приёмные антенны;
- используют помехоустойчивое кодирование передаваемых сигналов;

- применяют дополнительную обработку сигналов на борту КА.

§ 1.3. Особенности каналов связи космических аппаратов с высокоэллиптическими орбитами

Высокоэллиптические орбиты впервые были применены в Союзе Советских Социалистических республик (СССР) для передачи сигналов телерадиовещания для северных и приполярных территорий СССР. Для этих целей была запущена в космос на высокоорбитальные орбиты серия спутников системы "Молния" и создана сеть наземных станций.

Характеристики эллиптической орбиты:

1- Ближайшая точка к поверхности Земли на эллиптической орбите называется (перигей) и находится примерно в 548 км от поверхности Земли, в то время как самая дальняя точка называется (апогей), и она находится примерно в 39957 км от поверхности Земли, как показано на рис. 1.10.

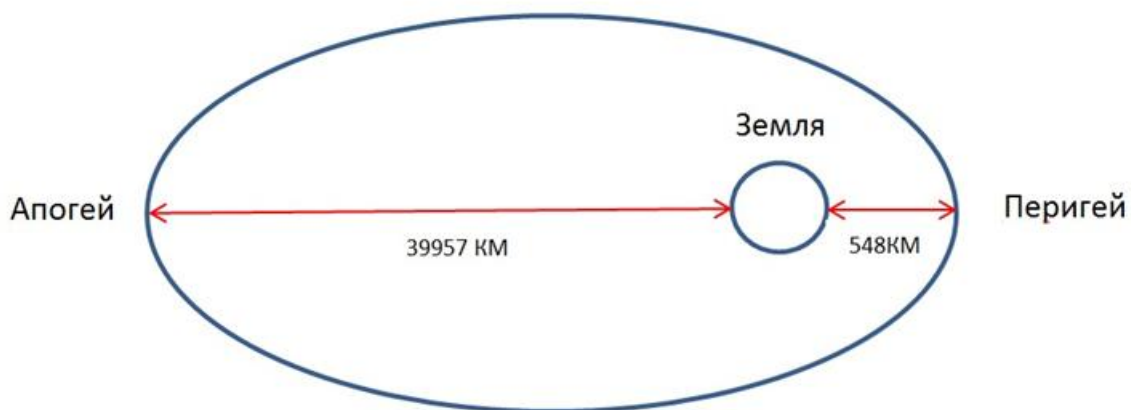


Рисунок 1.10: Точки перигея и апогея

2- Спутник остается над областью, находящейся под апогеем, около 8 часов. Непрерывный охват может быть обеспечен тремя или четырьмя спутниками находящимися в разных точках общей орбиты. как показано на рисунке 1.11. Спутники Молния были видимы с территории СССР и Канады, так как апогея полета приходилась над этими районами Земли.

Эллиптические орбиты позволяют осветить полярные районы, как показано на рис. 1.12. Особенность спутников с высокоэллиптическими орбитами использовалась для построения сети ретрансляционных узлов «Орбита», практически покрывавшей всю территорию СССР.

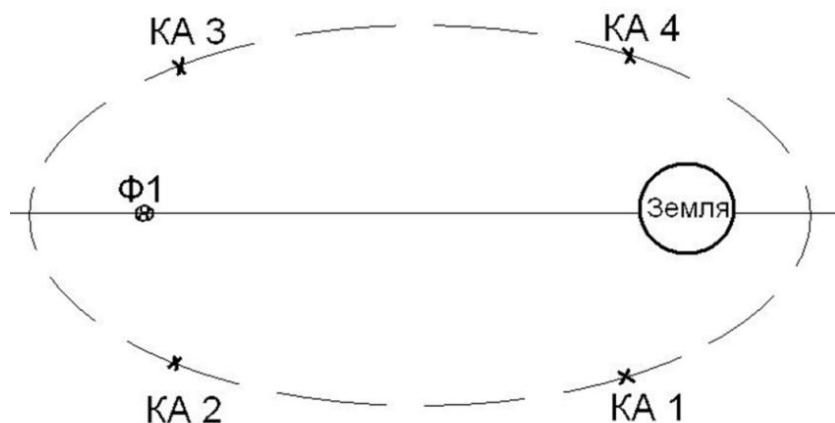


Рисунок 1.11: Эллиптические орбиты

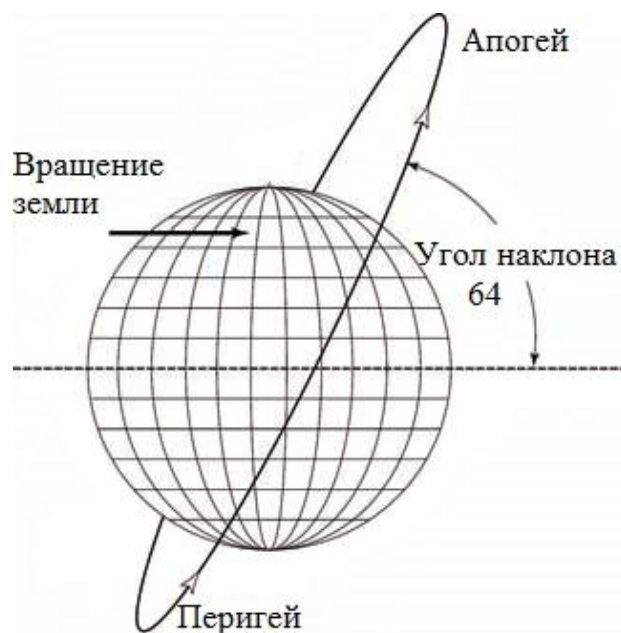


Рисунок 1.12: Угол наклона орбиты

3- Орбиты спутников Молния наклонены под углом 64° относительно экваториальной плоскости, как показано на рис. 1.12, и каждый спутник за сутки делал два оборота вокруг Земли. находясь в апогее примерно 4 часа. При таком угле наклона отличие формы Земли от шара практически не ощущается и не требуется дополнительная корректировка движения КА, что продлевает его срок жизни.

4- Высокоэллиптическая орбита оказалась устойчива по отношению к неравномерностям гравитационного поля Земли при этом охватывая большую территорию Земли радиосигналом, как показано на рисунке 1.13 [17].



Рисунок 1.13. Вид на Землю с КА в точке апогея: долгота апогея — 90° в.д. высота космического аппарата 39 867 км. [17].

Математик и астроном Иоганн Кеплер (1571-1630) первым обнаружил, что планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Он определил, что скорость планеты увеличивается по мере приближения к Солнцу и уменьшается по мере удаления от него.

По условию вращения тела вокруг Земли

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{G m M}{r^2} \quad (1.34)$$

где, $\frac{m v^2}{r}$ - центробежная сила, m - масса тела, v - орбитальная скорость, r - радиус орбиты, $\frac{G m M}{r^2}$ - гравитационная сила, G - универсальная гравитационная постоянная ($G = 6.67 \times 10^{-11}$ (N m² / kg²)), M - масс земли ($M=6 \cdot 10^{24}$ Kg).

Из уравнения (1.34) следует, что скорость спутника вокруг Земли будет равна:

$$v = \sqrt{\frac{G M}{r}} \quad (1.35)$$

Период (время) обращения спутника вокруг Земли:

$$P = \frac{2 \pi r}{\sqrt{\frac{G M}{r}}} \quad (1.36)$$

$P^2 = \frac{4 \pi^2 r^2}{\frac{G M}{r}}$, что приведет к $P^2 \propto r^3$ (третий закон Кеплера), это означает,

что скорость спутника обратно пропорциональна радиусу его орбиты. Период высокоэллиптической орбиты спутников Молния, Меридиан и заменяющих их перспективных спутников "Сфера-В" равен 12 часам.

Кроме задач теле и радиовещания высокоорбитальные спутники решают и оборонные задачи. Такие КА имеются у США и у России. Российские группировки высокоорбитальных спутников "Око", "Тундра", "Купол" решают важные задачи обнаружения пусков межконтинентальных баллистических ракет для защиты мира на Земле.

Особенностью радиоканалов с космическими аппаратами (КА), размещаемыми на высокоэллиптических орбитах явилась необходимость в обеспечении передающего оборудования наземных станций и спутников системами автоматической регулировки мощности и поворота антенн, так как расстояние между спутником и Землей непрерывно меняется. С одной стороны это сокра-

тило расход энергии на бортах КА, а с другой стороны несколько усложнило аппаратуру ретранслятора. Спутники Молния были заменены на спутники нового поколения Меридиан весом 2100 кг, мощностью энергоустановки 3,2 кВт и сроком жизни 7 лет.

КА «Меридиан» имеет три транспондера, работающие в разных частотных диапазонах. КА разделены на пары, двигаясь друг за другом по орбите с интервалом в 6 часов. В апогее КА находятся высоко над территорией России и перемещаются относительно Земли медленно, что упрощает процесс управления спутником.

При расчете энергопотенциала линий связи с высокоэллиптическими КА можно пользоваться выражением (1.34), учитывающим разнообразные причины потерь энергии сигнала при распространении.

Радиоканалы высокоорбитальных спутников имеют ряд достоинств:

- широкое использование частот различных диапазонов;
- значительное время распространения сигнала дает возможность покად-ровой передачи информации разным абонентам на одной частоте;
- в высоких широтах значительно больший угол места (более 12°) наземных систем по сравнению с геостационарными, что снижает ослабление сигнала наземными препятствиями.

Есть и недостатки у высокоорбитальных радиоканалов:

- радиоканал требует большей мощности от бортовых передатчиков по сравнению с геостационарными (до 500 Вт);
- необходим учет эффекта Доплера из-за движения КА;
- при пересечении радиационных поясов Земли возрастает вероятность ошибок;
- необходимы устройства слежения за спутником, сопряженные с автоматическими регуляторами мощности (АРМ) передатчиков;
- частоты ниже 10 МГц использовать нельзя, так как они экранируются ионосферой;

- при прохождении сигналов через атмосферу уровень ослабления сигналов и характеристики замираний сигнала зависят от угла направления наземной антенны на КА;

- большое время распространения сигнала создает трудности для работы в реальном времени, например, при телефонии.

§ 1.4. Радиоканалы низкоорбитальных космических аппаратов

Передаточные функции радиоканалов спутниковой радиосвязи значительно различаются по своим свойствам. Например, у низкоорбитальной спутниковой системы Гонец-Д1М, с космическими аппаратами (КА), находящимися на почти круговых полярных орбитах высотой 1400-1500 км, характеристики каналов связи с наземными абонентами существенно отличаются от характеристик радиоканалов этих спутников с КА, находящимися на геостационарных орбитах. При радиосвязи с наземными абонентами радиосигналы низкоорбитальных КА, летающих по орбитам высотой до 2000 км, проходят через атмосферу, затухая в ее газах и рассеиваясь на турбулентностях атмосферы и гидрометеорах различного вида (дождь, снег, туман). Под влиянием солнечной и геомагнитной активности происходит возбуждение ионосферы и большое число неоднородных образований различного размера, находятся в постоянном движении, рассасываясь и возникая вновь, что вызывает рассеяние и хаотичные повороты плоскости поляризации радиоволн. По этим причинам на антенну в точке приёма кроме основного сигнала, приходит множество рассеянных волн, интерференция которых вызывает замирания — случайные изменения амплитуды и фазы сигнала.

Низкоорбитальные КА, кроме мобильной персональной спутниковой связи (низкоорбитальные системы IRIDIUM и GLOBAL STAR, "Гонец Д1М"), применяются для дистанционного зондирования Земли, сбора метеорологических данных, для оптической фотосъемки с аппаратурой метрового разрешения - EROS-B, Ресурс-ДК, Cartosat-2, Kompsat-2 и дециметрового разрешения - WorldView, GeoEye-2 и др. Спутниковые фотографии требуются землеустроителям, лесникам, экологами, военным, картографам, подразделениям МЧС и другим службам, а полученные в весенний период, дают возможность прогнозировать урожай.

Масса и высота полета низкоорбитального спутника напрямую связана с его сроком жизни и со скоростью движения на орбите. Поэтому передача больших массивов информации на Землю при высокой скорости движения спутника по орбите (центробежная сила выравняется с центростремительной при скорости 7,9 км/с) создает серьезную проблему, так как высокоскоростной спутник не успевает передавать информацию на наземную станцию.

Проблему передачи массивов информации с низкоорбитальных КА на Землю можно решать разными способами. Например, в системе радиосвязи IRIDIUM спутник передает информацию по цепочке другим КА своей группировки до тех пор пока не достигнет спутника, находящегося в зоне видимости одной из наземных приемных станций. Но это требует большой группировки спутников, что слишком дорого. Спутники GLOBAL STAR сами передают информацию на Землю, но это требует большого числа наземных приемных станций, а во многих районах Земли их нет и это ограничивает возможности спутниковой группировки.

Другой способ передачи больших объемов информации на Землю заключается в передаче ее на геостационарные спутники, которые имеют постоянную связь друг с другом и с наземными станциями. Этот вариант сетевых взаимодействий кажется более выгодным, так как не требует мощной передающей аппаратуры на борту низкоорбитального КА и позволяет использовать уже существующую сеть наземных приемных станций. Рассмотрим этот вариант более подробно.

Радиоканалы низкоорбитальных КА со среднеорбитальными и геостационарными КА имеют большую протяженность, что вызывает сильное ослабление сигнала, называемое затуханием в свободном пространстве и описываемое выражением [18].

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \text{ дБ}, \quad (1.37)$$

где: L – потери передачи радиосигнала в свободном пространстве, R – расстояние линии связи, λ – длина волны.

Многолучевость в радиоканалах, проходящих только через космическое пространство, встречается редко. Она может возникнуть в основном за счет отражений сигналов от других КА и многочисленного космического мусора. Это определяет если не полное отсутствие замираний, то малую их глубину и малую дисперсию процесса запаздывания информационных посылок. Однако сильное ослабление радиосигналов на протяженных трассах и сложная помеховая обстановка в условиях ближнего космоса вынуждает применять меры по повышению помехозащищенности даже линий связи открытого космоса.

Частотные ограничения и возрастающие требования по увеличению скорости передачи информации и сокращению временных задержек сигналов при распространении стимулируют использование частот миллиметрового диапазона (ММД). Рассмотрим возможность использования частот ММД на радиолиниях связи низкоорбитальных КА со среднеорбитальными и геостационарными КА. Основным недостатком ММД состоит в том, что в атмосферных условиях сигналы ММД интенсивно затухают. Это вызвано как рассеянием миллиметровых волн на неоднородностях атмосферы, так и резонансным поглощением энергии волн молекулами кислорода и воды [19]. Молекулы воды и кислорода обладают электрическими и магнитными моментами, резонирующими на определенных частотах ММД, что вызывает интенсивное поглощение энергии радиоволн, как показано на рисунке 1.14.

ММД имеет ряд преимуществ по сравнению с другими диапазонами частот [20]. Основные достоинства ММД заключаются в следующем:

- возможность высокоскоростной передачи данных обеспечивает соблюдение требований осваиваемого поколения связи 5G;
- малые габариты антенных устройств, позволяют строить эффективные по усилению антенные решетки со сверхузкими диаграммами направленности и высокой скрытностью сигнала;

- многолучевость и замирания сигнала при острых диаграммах направленности антенн выражены слабо [21].

- малые габариты и масса антенных устройств, что важно для низкоорбитальных КА;

- возможность применения технологии пространственно-временного кодирования - ММО, значительно повышающей качество передачи информации;

- высокая защищенность от промышленных помех.

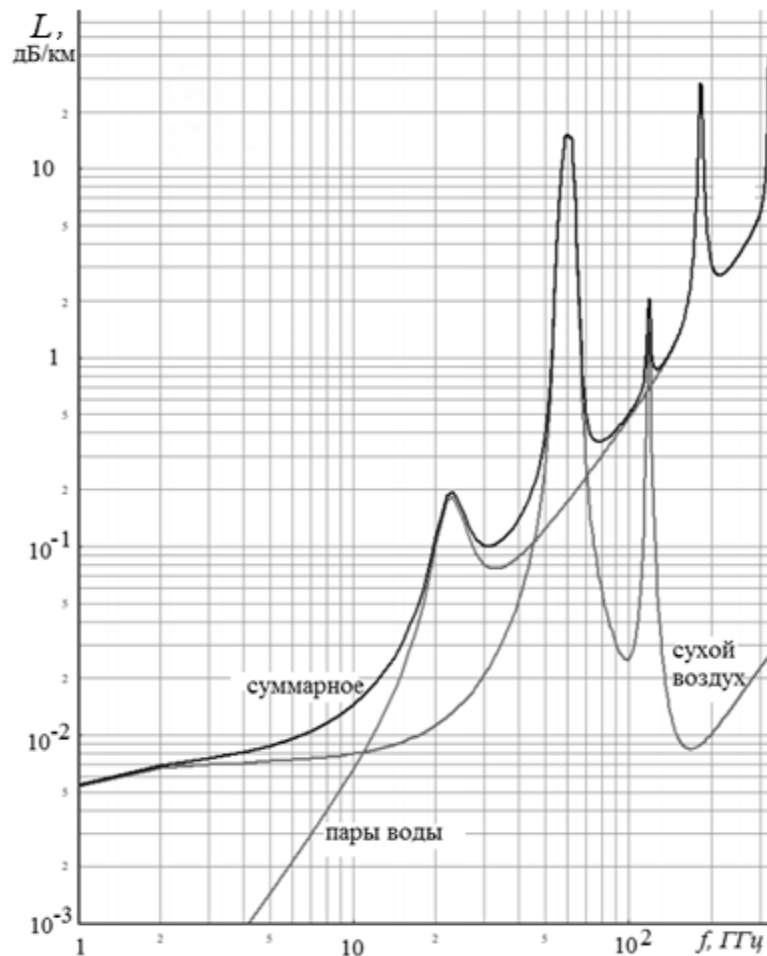


Рисунок 1.14. Погонное ослабление частот ММД в атмосфере [19]

На частотах 22,2 ГГц и 180 ГГц происходит значительное ослабление сигналов из-за поглощения в воде, а на частотах 60 ГГц и 118,8 ГГц из-за поглощения молекулами кислорода [19]. Но между низкоорбитальными и геостационарными КА нет водяного пара, а в сверхразреженной атмосфере молекулы кислорода встречаются редко. Поэтому частоты ММД с экстремальным

затуханием в атмосфере можно использовать для передачи информации с низкоорбитальных КА на геостационарные. При этом наземные источники не смогут создать ощутимую помеху низкоорбитальным КА из-за поглощения частот ММД в атмосфере. В свою очередь и сигналы КА на этих частотах миллиметрового диапазона не создадут помех наземным радиосредствам. С геостационарных КА информацию не сложно передать абонентам на Землю, используя штатные транспондеры.

Рассмотрим энергетический потенциал радиолинии от низкоорбитального КА до геостационарного спутника. Так как микрополосковая прямоугольная печатная антенна типа ПАТЧ на частоте 60 ГГц имеет размер 2,5x1,96 мм, и обеспечивает усиление до 9 дБ, то организовав антенную решетку размером 120x120 мм не сложно получить коэффициент усиления до 40 дБ [22]. Пороговую чувствительность приемного устройства определим выражением

$$P_{th} = kT\Delta f, \quad (1.38)$$

где: $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, T - эффективная шумовая температура антенны, Δf - полоса пропускания приемника по выходу усилителя промежуточной частоты.

Эффективная шумовая температура антенн линии связи от низкоорбитального КА до геостационарного спутника на частоте 60 ГГц при экранировании от земных радиостанций атмосферой (рисунок 1.14) практически совпадает с шумовой температурой космоса и не превышает 100°. Используя выражения (1.37) и (1.38) рассчитаем энергопотенциал линии связи, протяженностью 34 тыс. км., от низкоорбитального КА до геостационарного КА. Результаты расчета приведены на рисунке 1.15.

На рисунке 1.15 прямая OA показывает мощность радиопередающего устройства, прямые AB и CD показывают усиление передающей и приемной антенных решеток, прямая BC характеризует суммарные потери при распространении на расстояние в 34 тыс. км. и потери в антенно-фидерных устрой-

ствах на передающей и приемной сторонах линии связи. Линия BC^1D^1 показывает энергетику при помехоустойчивом кодировании.

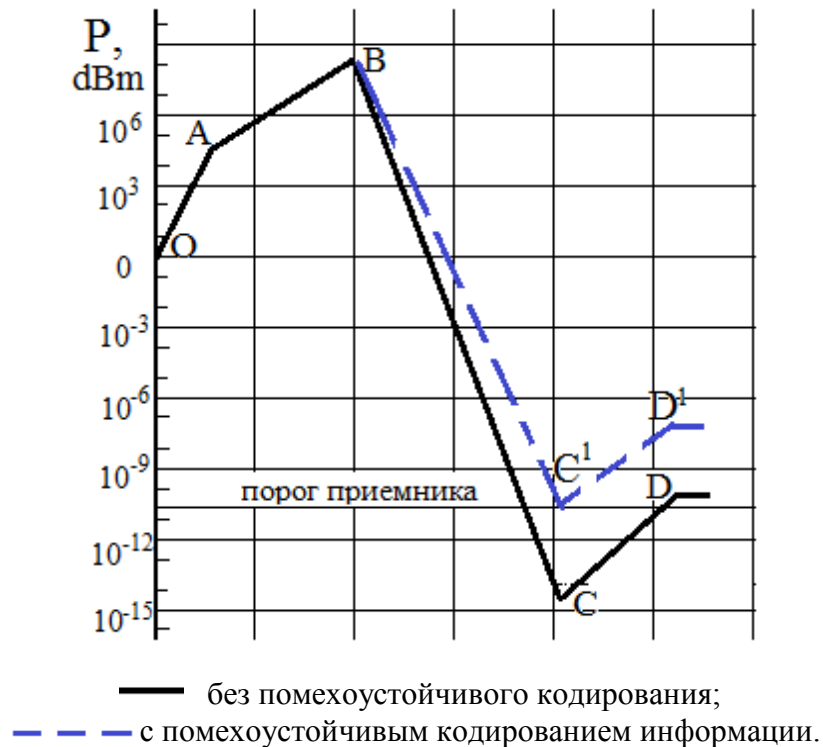


Рисунок 1.15. Энергопотенциал радиолинии между низкоорбитальным и геостационарным спутниками

По результатам расчетов видно, что передача больших объемов информации с низкоорбитальных КА на земную станцию возможна через геостационарные КА. При этом на радиолинии от низкоорбитального КА до геостационарного КА выгодно использовать частоту ММД, наиболее сильно затухающую в земной атмосфере. Использование частот ММД сократит вес и габариты антенных устройств, и одновременно улучшит помехозащищенность радиолинии. При применении на таких радиолиниях малогабаритных антенных решеток из 512 или 1024 микрополосковых антенн типа ПАТЧ мощность передатчика на борту низкоорбитального КА не превысит 1-2 Вт.

§ 1.5. Постановка задачи исследования

Проведенный аналитический обзор свойств радиоканалов, используемых космическими аппаратами спутниковых сетей радиосвязи (низкоорбитальных, геостационарных, с высокоэллиптическими орбитами), показал сильную зависимость свойств радиоканалов от большого числа параметров линий связи, и в значительной степени от высоты используемых орбит. Случайные процессы, происходящие в атмосфере и в ионосфере Земли, негативно влияют на качество передачи информации по каналам спутниковой связи. Это затрудняет расчет систем спутниковой радиосвязи и не позволяет при разработке систем находить наилучшие технические решения. Возникают проблемы и с тестированием новых разработок спутникового приемо-передающего оборудования. Поэтому актуальной становится задача создания универсальной модели спутниковых радиоканалов, адекватно воспроизводящей стохастические процессы, влияющие на радиосигналы спутниковых систем.

Выводы по главе 1.

1. Кратко рассмотрены системы спутниковой связи и их основные орбиты.

2. Проанализированы особенности радиоканалов спутниковой связи при геостационарной, низкоорбитальной и высокоэллиптической орбитах космических аппаратов.

3. Определено общее выражение для расчета энергопотенциала спутниковых линий связи.

4. Показано, что метод передачи информации с низкоорбитальных КА с помощью геостационарных КА значительно сокращает энергетические затраты на передачу информации при использовании частот ММД.

ГЛАВА 2. ЗАМИРАНИЯ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

§ 2.1. Влияние ионосферы на сигналы спутниковой радиосвязи

На распространение радиоволн существенное влияние оказывают атмосфера и ионосфера. Под воздействием космического излучения и ультрафиолетовых лучей Солнца в ионосфере молекулы воздуха ионизируются, образуя свободные электроны. Чем больше концентрация свободных электронов N_e , тем сильнее они влияют на распространение радиоволн [23]. N_e меняется по высоте, поэтому степень ионизации меняется в зависимости от высоты. На больших высотах, солнечное излучение интенсивно, но ионизация мала из-за малой плотности газа в атмосфере. Близко к Земле, где молекулярная концентрация высока, интенсивность ионизации низкая, так как для ионизации недостаточно энергии. Однако на некоторых промежуточных высотах (300 – 400 км) возникает пик плотности ионизации потому что N_e максимальна. По N_e свойствам выделяют четыре слоя: D, E, F1 и F2, как показано в таблице 2.1. Указанные слои имеют различную концентрацию N_e , и радиоволны, переходя из среды с одной концентрацией в среду с другой концентрацией, преломляются и при определённых условиях могут отразиться от ионосферы и вернуться на Землю [22], как показано на рисунке 2.1. На частотах выше 40 МГц, радиоволны движутся по прямой линии от земной станции к спутнику.

Радиоволны, распространяющиеся через ионосферу, испытывают различные механизмы ослабления, такие как поглощение, отражение, преломление, рассеяние, поляризацию, групповую задержку и затухание / сцинтилляция [23]. Ионосферный слой действует как отражатель для определенного диапазона частот (3-30 МГц) и пропускает более высокие частоты с незначительным их ослаблением.

Электромагнитные волны с частотами выше 30 МГц проникают в ионосферу и ослабляются за счет свободных электронов, присутствующих в ионо-

сфере. Ослабление мало и зависит от состояния ионосферы, поэтому его как правило не рассчитывают, компенсируя запасом на замирания сигналов при расчете радиолиний.

Таблица 2.1 Слои ионосферы

Слои ионосферы	Высота над поверхностью земли	Существуют днем (когда активность Солнца велика) и ночью	Поведение частот
Слой D, является частью слоя стратосферы	60 - 90 км	Только день.	Отражения низких частот (НЧ 30 -300 КГц), Поглощение средних (300кГц–3МГц) и высоких частот (3МГц – 30 МГц)
Слой E, находится над слоем D и является частью стратосферы	100 - 120 км	изменяется со временем года и суток. Днём опускается, ночью поднимается [23].	Помогает распространению поверхностных волн. Частично отражает частоты (3МГц–30 МГц)
Слой F1, является частью слоя мезосферы	120 - 190 км	Днем F1 сливается с F2 ночью. Он имеет самую высокую концентрацию Nэ.	Частично поглощает частоты (3МГц–30 МГц), но позволяет им достигать слоя F2
Слой F2, является частью термосферы	250 - 450 км в дневное время, 300 км ночью	Днем и ночью. Он имеет самую высокую концентрацию Nэ.	Эффективно отражает высокие частоты (3МГц–30 МГц)

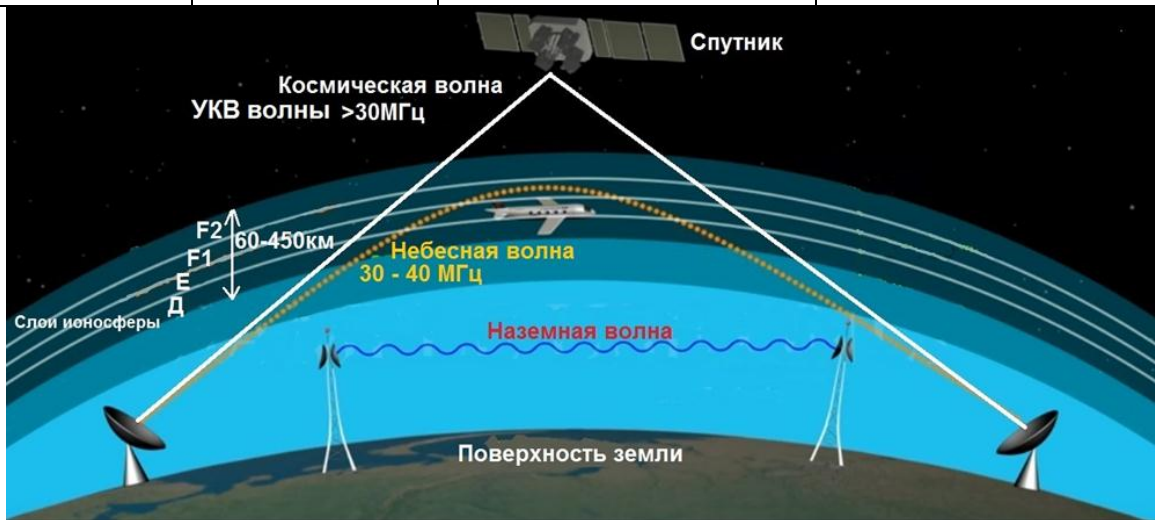


Рисунок 2.1 Ионосферный слой

Степень преломления лучей ЭМВ в слоях ионосферы зависит от угла падения волн (γ) на слои ионосферы и от частоты излучения. Угол падения,

при котором ЭМВ не проходит через ионосферу и распространяется вдоль неё, называется критическим ($\gamma_{кр}$) как показано на рисунке 2.2. Он определяется выражением [23].

$$\gamma_{кр} = \arcsin \sqrt{1 - 81N_3/f^2} , \quad (2.1)$$

где: $\gamma_{кр}$ - критическим угол, N_3 - концентрация свободных электронов, f - частота излучения.

Если $\gamma < \gamma_{кр}$, то ЭМВ проникает через ионосферу в космос. Если $\gamma > \gamma_{кр}$, то ЭМВ отражается от ионосферы и возвращается на Землю.

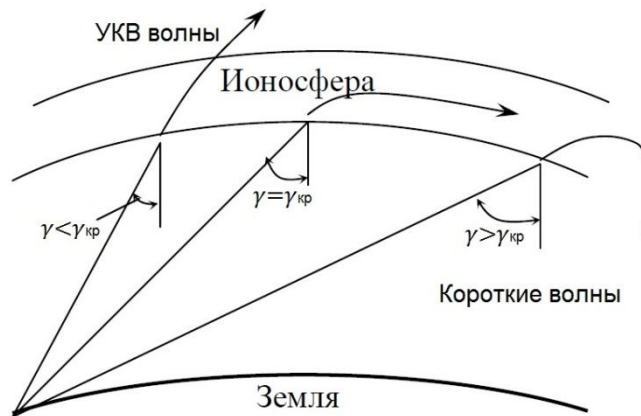


Рис. 2.2 Преломление и отражение в слоях ионосферы

Из (2.1) следует, что чем выше частота ЭМВ, тем меньше степень преломления. УКВ волны мало преломляются в ионосфере и уходят в космос, как показано на рисунке 2.2. Частота, при которой волна распространяется вертикально $\gamma_{кр}=0$, называется критической ($f_{кр}$). Из (2.1) при $\gamma_{кр}=0$.

$$\gamma_{кр}=0, \quad \arcsin \sqrt{1 - \frac{81 \cdot N_3}{f_{кр}^2}} = 0$$

$$\arcsin (0) = 0, \quad \sqrt{1 - 81 \cdot N_3 / f_{кр}^2} = 0$$

$$\left(\sqrt{1 - 81 \cdot N_3 / f_{кр}^2} \right)^2 = 0 \implies 1 - 81 \cdot N_3 / f_{кр}^2 = 0 \implies 81 \cdot N_3 / f_{кр}^2 = 1$$

$$f_{кр} = \sqrt{81 \cdot N_3} = 9\sqrt{N_3} \quad (2.2)$$

Для максимальной концентрации N_3 , $f_{кр}$ составляет единицы МГц. При наклонном падении отражающие свойства ионосферы более существенны. Частота ЭМВ, излучённой по касательной к горизонту, в 3 – 5 раз больше частоты $f_{кр}$. Такая частота называется максимально применимой частотой и более высокие частоты от ионосферы не отражаются.

ЭМВ, распространяющиеся путём отражения от ионосферы, называются пространственными волнами. Эти волны могут распространяться на большие расстояния путём однократного или многократного отражения от нижних слоёв ионосферы и Земли как в своеобразном волноводе [23], как показано на рисунке 2.3. Пространственные волны почти полностью поглощаются ионосферой. В ночное время, когда ионизация газа в ионосфере резко падает, интенсивность пространственного луча возрастает, что способствует эффективному распространению гектометровых волн на расстояние до нескольких тысяч и даже десятков тысяч километров.

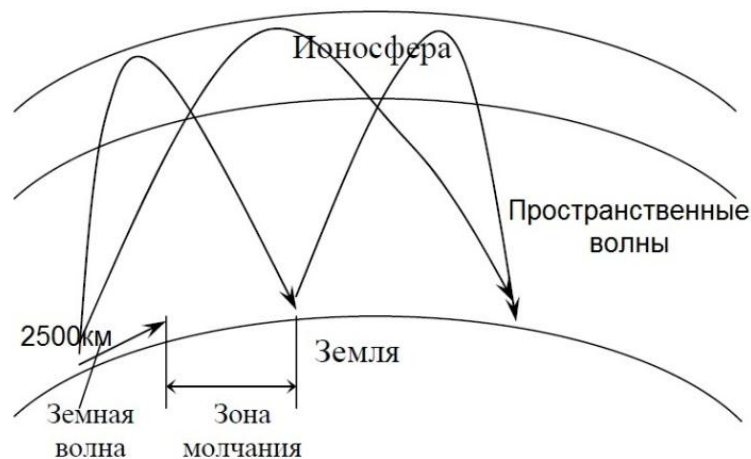


Рис. 2.3. Отражение в ионосфере радиоволн коротковолнового диапазона

Недостатки пространственных волн:

1- За счёт интерференции одношагового и многошагового распространения пространственных волн имеют место замирания сигнала в точках приёма.

2- Образуются зоны молчания, когда связь пространственными волнами ещё невозможна.

Не так давно считалось, что на частотах УКВ и на более высоких частотах ионосфера практически не влияет на распространение радиосигналов. Но появившиеся средства мониторинга с помощью навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, Галилео, Бейджоу позволили уточнить это положение. Было экспериментально доказано, что ионосфера влияет на фазовые задержки и вносит повороты плоскости поляризации при прохождении сигналов через ионосферу [24]. Эти эффекты проявляются на частотах до единиц гигагерц и особенно сильно заметны во время магнитных бурь в полярных районах Земли [25].

На спутниковую радиосвязь в диапазонах частот выше 10 ГГц ионосфера оказывает слабое влияние и ионосферные сцинтилляции, приводящие к некоторому повороту поляризации и медленным замираниям амплитуды сигналов обычно компенсируют запасом энергопотенциала на линиях связи. На теоретическом уровне наиболее подробно влияние ионосферы учитывают при расчетах радиоканалов коротковолновых систем и систем радиоастрономии [26].

Радиосигнал, приходящий со спутника на наземную станцию, как правило является многолучевым из-за рассеяния на неоднородностях атмосферы и переотражений от земной поверхности и от местных предметов, как показано на рис. 2.4. Многолучевость приводит к интерференционным замираниям на входах приемников спутниковой связи. Статистика таких замираний достаточно подробно исследована для систем наземной радиосвязи, но для спутниковых систем она изучена недостаточно. При расчетах радиолиний со спутниками в соответствии с рекомендациями Междунородного союза электросвязи-распределение замираний считают подчиненным релеевскому закону распре-

деления вероятностей. Наличие замираний требуется учитывать при разработке математической модели спутникового радиоканала.

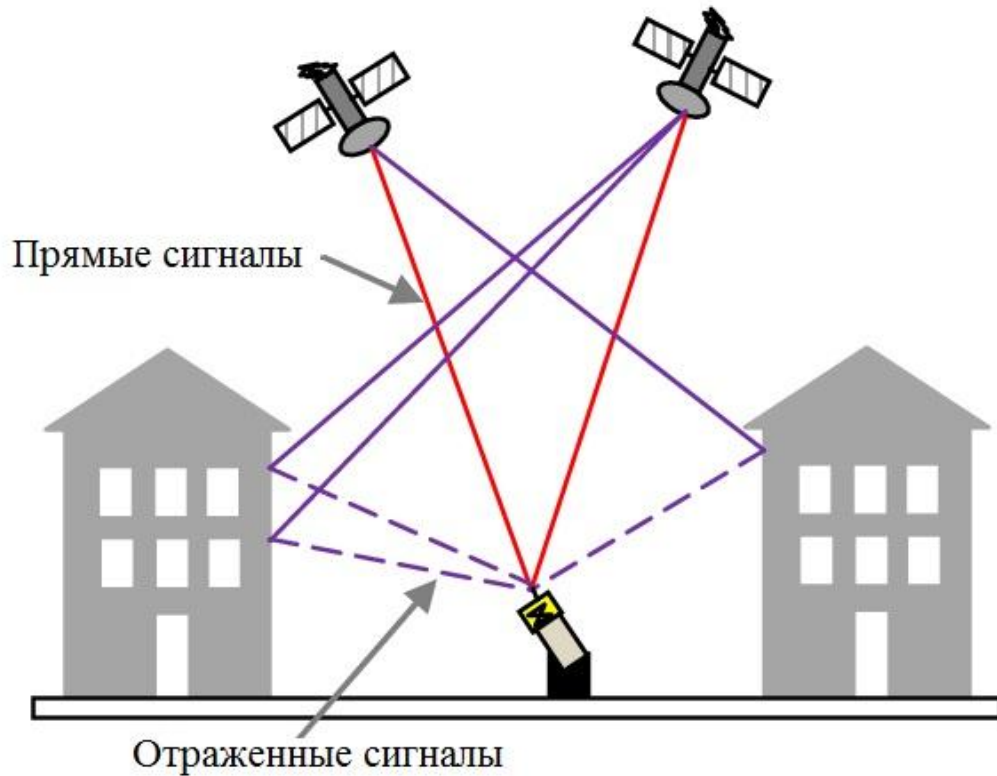


Рис. 2.4. Многолучевое распространение радиосигнала спутник-Земля

Многолучевость исключительно негативно влияет на качество связи и ущерб от нее в спутниковых радиоканалах принято компенсировать применением помехоустойчивого кодирования.

§ 2.2. Затухание спутниковых сигналов при распространении через атмосферу

При передаче данных от спутниковых систем связи все еще существует много трудностей, особенно в каналах связи. Прежде всего, они вызваны ростом затухания радиоволн с ростом частоты и расстояния связи, как следует даже из выражения затухания в свободном пространстве [2].

$$B = 20 \lg \left(\frac{4\pi Rf}{C} \right) \quad (2.3)$$

где: R - расстояние между передатчиком и приемником (м), C - скорость света (м/с), f - частота несущей (Гц).

При прохождении радиоволн через атмосферу возникает дополнительное ослабление сигнала, так называемые атмосферные потери [33]. Кроме того, на распространение радиоволн существенно влияет плотность атмосферы, которая уменьшается по высоте [27]. На малых высотах (тропосфера и стратосфера земли) радиоволны теряют свою энергию главным образом из-за:

- потерь в атмосферных газах;
- поглощение, затухание и рассеяние в облаках и турбулентностях атмосферы;
- ослабление от дождя, снега, града, тумана и других гидрометеоров [3].

Затухание сигналов в прозрачной атмосфере из-за газов мало и обычно не превышает 1 дБ, но кислород и водяной пар в нижней части атмосферы, называемой тропосферой (с высотами до 20 км), существенно влияют на затухание сигналов особенно на частотах миллиметрового диапазона, в то же время на частотах ниже 3 ГГц затухание в газах атмосферы невелико и им часто пренебрегают [4, 35].

Молекулы кислорода обладают постоянным магнитным моментом, и из-за взаимодействия этого момента с магнитным полем волны на определенных частотах происходит сильное поглощение энергии волны [28]. В молекулах воды на некоторых частотах миллиметрового диапазона возникают резонансные явления, которые оказывают сильное негативное влияние на распростра-

нение радиоволн. Поглощение радиоволн растет с ростом плотности воды в атмосфере. Плотность водяного пара (ρ) может быть рассчитана на основе одновременных измерений температуры и относительной влажности, как показано в работе [4]:

$$\rho = (U/5.752) [\theta^6 \cdot 10^{(10-9.834\theta)}] \quad (2.4)$$

где: U - относительная влажность воздуха в процентах, θ - величина, зависящая от измеренной температуры T_0 воздуха, равная $\theta = 300 / T_0$.

Скорость дождя, размер капель, снег, град, туман и другие гидрометеоры сильно влияют на распространение радиоволн, особенно в миллиметровом диапазоне с точки зрения затухания, деполяризации и вносимого шума [3, 32]. Но для частот ниже 3 ГГц, затухание из-за дождя и облаков невелико и им часто пренебрегают [4].

Например, ослабление в дождях может быть описано выражением, [13]:

$$B_d = \left(\frac{f}{70}\right)^2 Y, \quad [\text{дБ/км}] \quad (2.5)$$

где: Y - интенсивность дождя [мм/ч], f - несущая частота [ГГц].

Восходящая и нисходящая линии связи по-разному подвержены воздействию дождя. На нисходящей линии связи сигнал уменьшается, а шум увеличивается. На восходящей линии связи сигнал уменьшается, но шум растет незначительно [33]. Следующее математическое уравнение описывает изменение уровня шума (N) из - за дождя.

$$\Delta N = 10 \log \left(\frac{T_{\text{Система_Дождь}}}{T_{\text{Система_Чистое Небо}}} \right) \quad (2.6)$$

В атмосфере бывают пыльные и песчаные бури, характеризующиеся очень сильным ветром и воздухом, наполненным пылью и песком на большой площади. Они наблюдаются во многих районах мира, включая Африку, за-

сушливые районы Азии, Ближний Восток и Северную Америку. Часто пыльные бури возникают в пустынном климате и в обычных районах при длительной засухе, приводя к выдуванию почвы и запыленности атмосферы.

Последствия пыльных бурь огромны для авиации и телекоммуникаций, поскольку они накапливают и переносят пыль в атмосферу. Пыльные бури представляют опасность для качества и надежности связи в пострадавших регионах. Частицы от пылевых бурь могут подниматься достаточно высоко, на километры над поверхностью земли, вызывая тем самым потерю сигнала и приводя к отключению системы или перебоям в обслуживании [34].

Растет интерес исследователей к воздействию частиц песка и пыли на распространение микроволн (300 МГц–300 ГГц), и миллиметрового диапазона с точки зрения затухания, деполяризации, фазовой задержки, и шума [32]. Это вызвано увеличением числа наземных и спутниковых линий связи или наклонных трасс связи, установленных в регионах мира, которые сталкиваются с пыльными и/или песчаными бурями, а также многими другими радиолокационными приложениями, особенно на высоких частотах. Из-за пылевых бурь становится все сложнее эффективно управлять системами, которые страдают от ослабления сигнала из-за пылевых бурь [34].

Взвешенные частицы вызывают затухание сигнала на линии Земля-спутник в течение значительного процента времени, что может повлиять на качество и надежность телекоммуникационных услуг [34]. Сигналы ослабляются за счет поглощения и рассеяния энергии [30]. Частицы пыли являются важным фактором при расчетах затухания как в связи, так и в радиолокации и телеуправлении.

Модель затухания основана на принципе моделей распространения радиоволн и свойствах запыленной среды-воздуха с взвешенными частицами пыли или песка [34].

Затухание и фазовая задержка происходят из-за свойств материала среды распространения и комплексного коэффициента распространения. Кроме того,

обоснованность затухания подтверждается работой [31]. Затухание уменьшается по мере увеличения видимости и наоборот.

Установлено, что перекрестная поляризация может быть серьезной, когда на пути распространения волны более 1 км видимость ниже 10 м. Это может привести к потере сигнала в микроволновых и миллиметровых каналах связи [31].

Расчеты эффектов пылевых и песчаных бурь требуют всестороннего знания электрических свойств рассеивающих частиц и климатических условий исследуемого региона. Ирак имеет большую площадь, и он считается страной с климатическим опустыниванием. Станции дистанционного зондирования атмосферы были установлены в южных и центральных районах Ирака, где пылевые и песчаные бури могут влиять на распространение микроволнового сигнала [30].

Мы исследуем влияние песчаных и пылевых бурь на беспроводную связь, такую как линии связи Земля-спутник, с точки зрения оптической видимости, угла возвышения и опорной высоты антенн для оценки величины затухания. В южной области Ирака (Басра, Ди-Кар и Мутана), западной области (Аль-Анбар), центральной области (Багдад (столица Ирака) и Кадисия), восточной области (Дияла) и, наконец, в северной области (Ниневия и Киркук) определим зависимость ослабления радиосигнала из-за пыльных бурь на основе реальных данных Иракской Метеорологической Организации в Багдад область за период четырех лет с 2016 по 2020 год.

§ 2.3. Влияние радиационных поясов Земли

Радиоволны с Земли проходят через космические радиационные пояса, показанные на рис. 2.5. Пояса возникли из-за магнитного поля Земли, притягивающей быстрые радиоактивные частицы, прилетающие из космоса.



Рисунок 2.5. Внутренний и внешний радиационный пояс

Американский ученый Ван Аллен принимал участие в разработке американских искусственных спутников Земли. Им с учениками в 1958 году были обнаружены окружающие Землю радиационные пояса, образованные высокоскоростными заряженными частицами, прилетающими из космоса (солнечный ветер). Это явление получило название пояса Ван Аллена. Было доказано, что мощные низкочастотные излучения радиопередатчиков с Земли влияют на радиационные пояса, перемещая заряженные частицы.

Интересно, что исследователи никогда не наблюдали пояса Ван Аллена, поскольку они “естественны”. Это связано с тем, что очень низкочастотные радиопередатчики использовались, по крайней мере, с 1920-х годов для отправки телеграфных сообщений и для связи с подводными лодками, а существование поясов было подтверждено только в 1958 году. Новые наблюдения подтверждают, что радиопередатчики на Земле вызывают утечку заряженных частиц из внутреннего радиационного пояса Ван Аллена в космос [48].

Радиационные пояса по форме похожи на тороид, в котором выделяются две области [51]:

- внутренний радиационный пояс, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- внешний радиационный пояс, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

Высота внутреннего радиационного пояса примерно 4000 км, а внешнего 17000 км.

Геомагнитное поле Земли удерживает заряженные частицы в двух концентрических поясах, опоясывающих планету. Частицы могут покинуть внешний пояс примерно за неделю, но внутренний пояс может удерживать частицы около года. Это потенциально может привести к опасному накоплению частиц после солнечных бурь или ядерного взрыва в космосе. Высокие уровни заряженных частиц могут повредить глобальное позиционирование и сигналы других типов спутников, которые вращаются в зоне Ван Аллена, как показано на рисунке 2.6 [49].

Наблюдения показали, что низкочастотные радиоволны (от 5 до 25 кГц), передаваемые на Землю, помогают очищать частицы от внутреннего пояса. Ночью, когда через атмосферу Земли может проходить больше сигналов низкой частоты, французский спутник под названием DEMETER измерил больше электронов вблизи внутреннего пояса, когда был включен мощный передатчик в Австралии, чем когда он был выключен. Передатчик помогает рассеивать электроны, но силу эффекта еще предстоит определить, отметив, что радиационные пояса заметно не изменились в течение нескольких месяцев, когда передатчик был отключен [50].

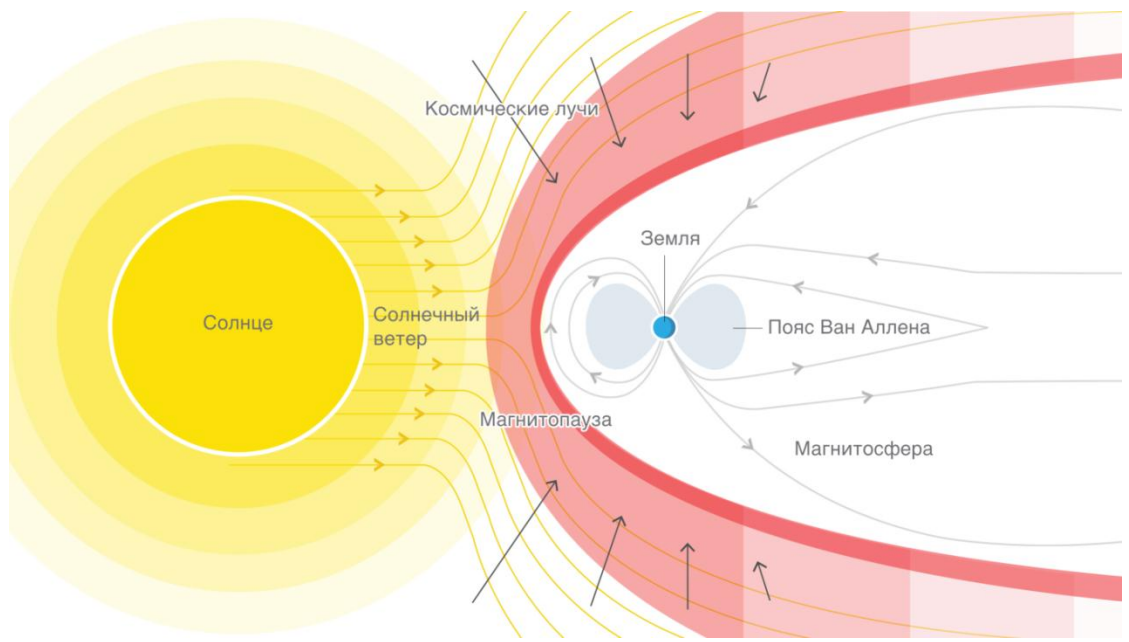


Рисунок 2.6. Солнечная буря

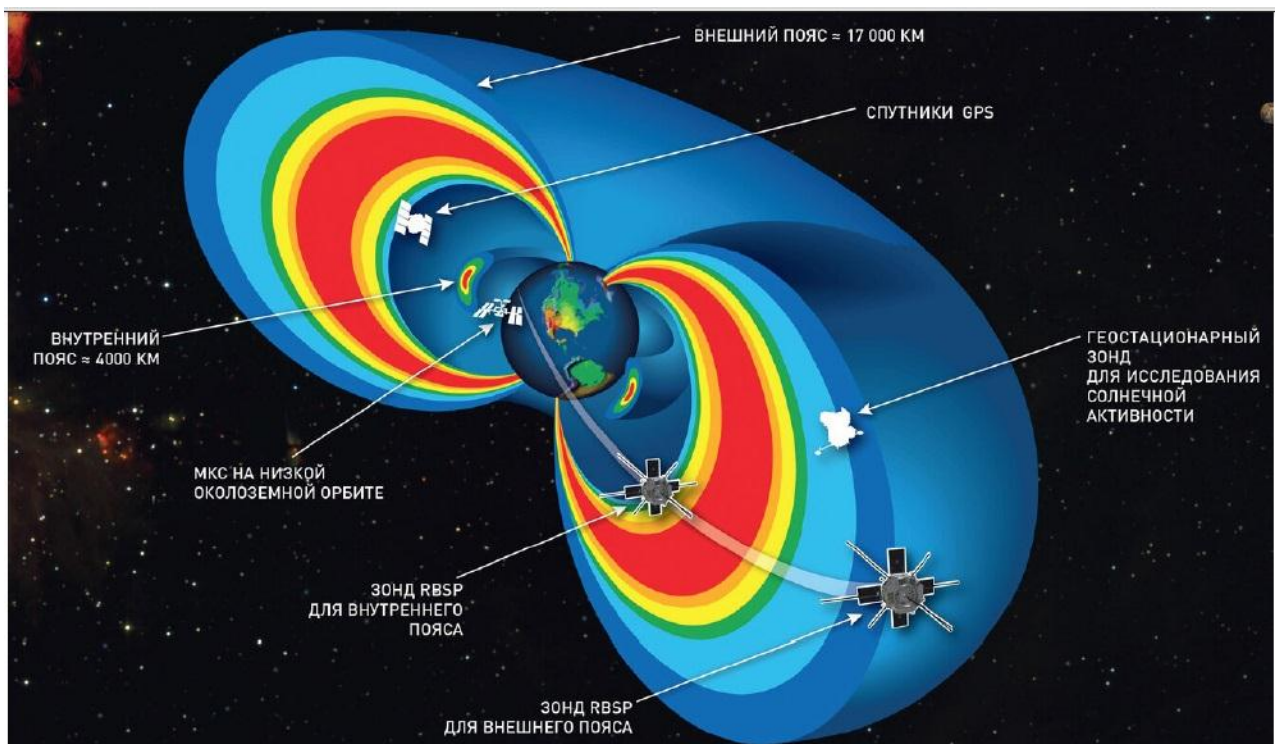


Рисунок 2.7. Влияние радиационных поясов Земли

При высокой солнечной активности часто происходят магнитные бури и потоки ионизированных частиц приближаются к Земле [51-54]. Сильная ионизация атмосферы вызывает полярные сияния, которые могут длиться несколько суток. Это отрицательно влияет на радиосвязь, в том числе и спутниковую, так как эфир зашумляется [55]. После проводимых США и СССР ядерных взрывов в атмосфере возникают искусственные радиационные пояса, которые могут привести к протяженным срывам связи .

Перемещение ионизированных частиц под влиянием изменений солнечной активности во время магнитных бурь из внутреннего пояса во внешний и наоборот приводит к дополнительным негативным последствиям. Отмечено [56] влияние нестабильности радиационных поясов на поляризацию радиосигналов.

Многие системы спутниковой связи используют методы поляризации радиосигналов для разделения доступа абонентов к связи и флуктуации поляризации в таких системах приводят к колебаниям уровня сигнала, принимаемого в системе спутниковой связи. Хотя это наблюдается только во время магнитных бурь, но учитывая их протяженность, это явление также необходимо учитывать при построении новых систем спутниковой связи.

§ 2.4. Классификация пыльных и песчаных бурь

Пылевые частицы, возникающие из-за эрозии почвы, сдуваются с земли и взвешиваются в воздухе ветром, вызывая пылевые бури, то есть пылевые туманы и облака, переносимые ветром на значительные расстояния. Пыльные и песчаные бури, распространенное явление, которое часто встречается в засушливых и полузасушливых регионах мира, например в Ираке [38]. Разница между пыльными и песчаными бурями заключается в том, что основными компонентами пыльных бурь являются земля, грязь, ил и песок. Что касается песчаных бурь, то основным их элементом является только песок. Другим отличием является высота шторма, так как пыльная буря, благодаря легкости и небольшому размеру частиц, по сравнению с частицами песчаной бури, из-за турбулентности воздуха переносится на большие высоты.

Пыльные бури исключительно неблагоприятное природное явление, влияющее негативно на здоровье людей и общую экологическую обстановку. Засорение атмосферы приводит к большому числу отрицательных факторов, в том числе к снижению оптической видимости и к затуханию распространяющихся в атмосфере радиоволн [36, 37, 38, 46].

Ирак, регион Персидского залива и Аравийский полуостров относятся к числу районов арабского мира, наиболее подверженных этому явлению [38]. Ирак нельзя считать единственной страной в мире, страдающей от этой проблемы, хотя пыльные бури стали обычным явлением в стране, как показано на рис. 2.8. Например, в России при засухе и из-за интенсивной распашки сельскохозяйственных земель такие бури тоже неоднократно наблюдались. Так в 2020 году три месяца на юге России не было дождей, и в конце сентября 2020 года несколько дней в Ставропольском крае бушевала пыльная буря. Скорость ветра при этом составляла 22 м/с [36].

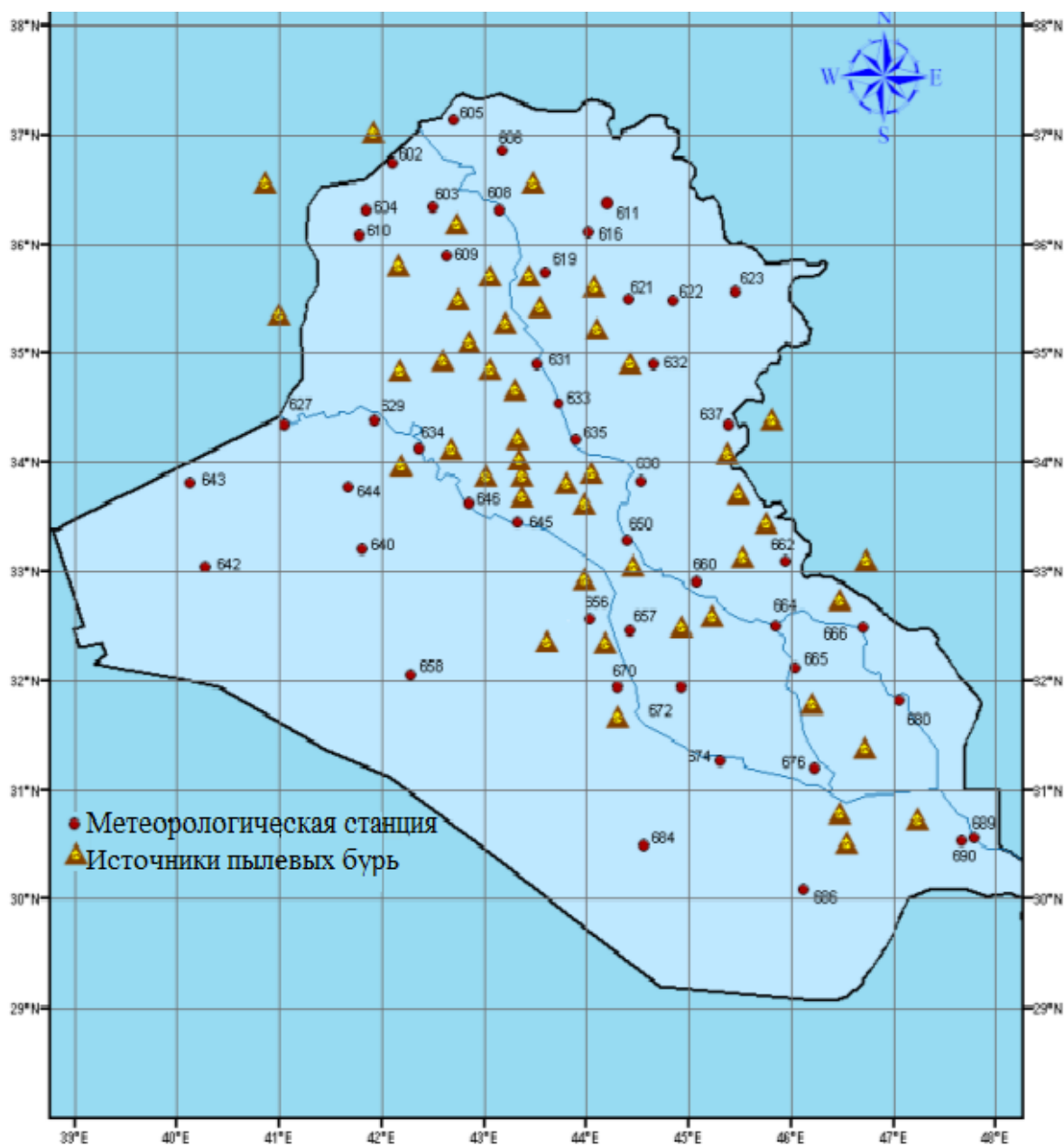


Рис 2.8. Места возникновения пыльных бурь в Ираке

В Рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ или ИТУ) прямо сказано, что влияние пыльных бурь на распространение радиосигналов пока не изучено. Цитата из рекомендаций МСЭ [41]: "О влиянии песчаных и пылевых бурь на радиосигналы на наклонных трассах известно очень мало. Имеющиеся данные показывают, что на частотах ниже 30 ГГц только высокая концентрация частиц и/или высокая влажность могут оказать значительное влияние на распространение радиоволн".

Учитывая отрицательное влияние пыльных бурь на здоровье человека, распространение радиоволн, авиационные сообщения, системы солнечной энергетики и др. в соответствии с программой ООН по окружающей среде в 2007 году была создана Система по обнаружению и предупреждению о песчаных и пыльных бурь (SDS-WAS) [42]. Система SDS-WAS имеет несколько региональных узлов:

- Северная Африка, Ближний Восток и Европа, координируются Региональным центром в Барселоне, Испания, размещенным в Государственном метеорологическом агентстве (АЕМЕТ) и Барселонским суперкомпьютерным центром (BSC);
- Азия, координируется Региональным центром в Пекине, Китай, который находится в ведении Китайской метеорологической администрации (СМА);
- Третий центр, размещен в Карибском институте метеорологии и гидрологии (СИМН) на Барбадосе.

На рис. 2.9 и 2.10 приведены фотографии пыльных и песчаных бурь, характерных для Ирака.

В задачи этих центров кроме обнаружения пыльных бурь входит их исследование и прогнозы возникновения и интенсивности. 17-й Всемирный метеорологический конгресс высоко оценил тот факт, что SDS-WAS, совместная деятельность Глобальной службы атмосферы и Всемирной программы исследований погоды, повысила осведомленность и способствовала лучшему пониманию явлений, связанных с пылью и пылевыми и песчаными бурями [42].

Решению задач по изучению и прогнозу пыльных бурь помогают и государственные гидрометеорологические структуры, такие, например, как Республиканская гидрометеорологическая служба Сербии, Китайская академия метеорологических наук, Иракская метеорологическая организация, Гидрометеорологическая служба России и другие.



Рис. 2.9. Пыльная буря в Ираке



Рис. 2.10. Песчаная буря в Ираке

Рассмотрим влияние пыльных бурь на распространение радиоволн. Ослабление СВЧ-сигналов в пылевых средах может происходить за счет двух физических механизмов – рассеяния и поглощения энергии взвешенными частицами пыли. Для решения этой задачи потребуется создать классификацию пыльных и песчаных бурь и выяснить основные факторы, от которых они зависят.

Пыльные бури различаются по плотности, размерам, интенсивности, высоте (в пределах до 6 км [42]) и расстоянию, которое они преодолевают. Переносимые ветром пыльные бури могут преодолевать тысячи километров, перемещаясь по континентам [43]. Пыльная буря может нести большое количество пыли, до 4000 тонн/милю [44]. Пыль также различается по составу и плотности в зависимости от происхождения и скорости несущих ее ветров. Поэтому классифицировать пыльные бури можно по различным критериям, таким как плотность пыли, скорость перемещения, интенсивность, средние размеры частиц пыли и др.

Наиболее удобным критерием для классификации пыльных бурь является такой, величину которого сравнительно просто измерять с высокой точностью. Пыльные образования зависят от многих факторов, поэтому в качестве критериев для классификации пыльных и песчаных бурь выберем два показателя: видимость (V_0), которая легко измеряется простыми техническими средствами, например, с помощью фотодетекторов и скорость ветра (v_B), также легко измеряемая. При этом видимость явится основным критерием, а скорость ветра дополнительным, характеризующим подвижность пыльных образований. Связь между видимостью и фактическим количеством пыли впервые определена в 1938 в работе [39].

Кроме видимости и скорости ветра есть и множество других параметров, например, концентрация пыли, форма и размер пылевых частиц и ряд других (см. приложение 1), но видимость и скорость ветра в максимальной степени характеризуют состояние пыльной бури и ее поведение. Поэтому в соответ-

ствии с предложенными критериями пыльные бури можно разделить на четыре категории, как показано в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Классификация пыльных бурь

Наименование категории	Видимость, V_o , км	Скорость ветра, V_B , м/с	Высота, h_1 , км
Взвешенная пыль	$1 < V_o < 6$	$V_B < 4$	$h_1 < 5,5$
Поднимающаяся пыль	$V_o > 1$	$4 < V_B < 7$	$h_1 < 5,5$
Песчаная буря	$V_o < 1$	$V_B > 7$	$h_1 < 0,05$
Пыльная буря	$V_o < 1$	$V_B > 7$	$h_1 < 6$

Следует отметить, что взвешенная пыль, как показано на рис. 2.11, это предпоследняя стадия пылевых бурь и восходящих пылевых явлений. Частицы пыли остаются зависшими после затишья ветра и медленно оседают под влиянием гравитации Земли на землю.



Рис. 2.11. Взвешенная пыль в столице Ирака Багдаде

В некоторых случаях видимость при взвешенной пыли может упасть ниже 1 км, что можно назвать плотной взвешенной пылью. Ее появление может обычно связано с присутствием пыльной бури в другом месте, переносимой активными ветрами на расстояния, далекие от источника ее возникновения. Чем дальше шторм от начала градиента давления, тем ниже скорость ветра, а так как пылевые частицы характеризуются небольшими размерами и малым весом, то даже малая скорость ветра может переносить частицы пыли и удерживать их в воздухе в течение длительного времени (1 - 15 часов) [45].

Поднимающаяся пыль, показанная на рис. 2.12, это начало пылевых бурь, когда частицы пыли поднимаются под влиянием умеренных ветров, скорость которых находится в пределах 4-7 м/с, а горизонтальный диапазон видимости превышает 1 км ($V_0 > 1$ км, примерно до 1 - 3 км над поверхностью Земли). При такой скорости ветра пыль не переносится на большие расстояния, но подняться может на высоту в несколько километров.



Рис. 2.12. Поднимающаяся пыль в Багдаде

Видимость в атмосфере зависит от концентрации частиц (пыли и гидрометеоров). Концентрация, в свою очередь, влияет на затухание сигналов из-за поглощения энергии радиоволн твердыми частицами и рассеяния радиоволн на них. То есть при определении затухания радиосигналов в пыльных бурях необходимо использовать среднюю эквивалентную концентрацию пыли на различных высотах.

Зависимость диаметра частиц пыли от высоты была экспериментально определена в работе [39]. Исследования проводились вплоть до высоты в 6 км. Линейная зависимость в логарифмическом масштабе позволяет прогнозировать размер частиц пыли до высот в несколько километров. Результаты такого прогноза показаны на рис. 2.13.

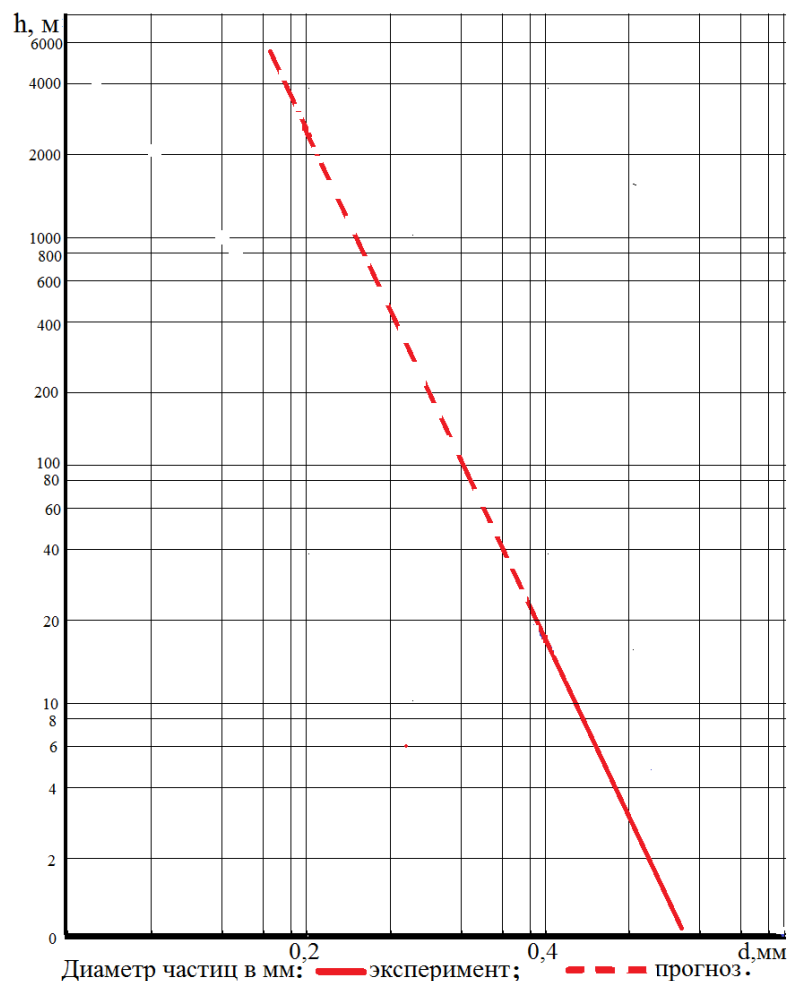


Рис. 2.13. Измеренный и спрогнозированный средний эквивалентный диаметр частиц пыли на различных высотах для пыльных бурь в штатах Канзас и Колорадо, США [39].

Аппроксимация этой зависимости дает возможность определять эквивалентный размер частиц пылевой бури на различных высотах h .

$$d = \frac{0,033}{h^{0,13}}, \quad (2.7)$$

где: d [мм] - эквивалентный диаметр пылевых частиц, h [мм] - высота частиц пыли.

Гравитация удерживает пыль на поверхности Земли. Чем тяжелее частица пыли - из-за размера, плотности или - тем сильнее сила гравитации, удерживающая ее. Пыльная буря может произойти только тогда, когда сила ветра превышает пороговое значение для рыхлых частиц, поднимаемых над землей. Около 40 % аэрозолей в атмосфере Земли являются частицами пыли от ветровой эрозии [43]. Основными источниками этой минеральной пыли являются засушливые районы Северной Африки, Аравийского полуострова, Центральной Азии и Китая.

Пыль поднимается в атмосферу за счет турбулентного перемешивания воздуха и конвективных восходящих потоков. Затем под действием ветра пылевые облака переносятся на большие расстояния, в зависимости от их размера и метеорологических условий. Гравитация притягивает пылинки к Земле и чем пылинки крупнее, тем быстрее они оказываются на Земле в осадке. Среднее время жизни частиц пыли в атмосфере колеблется от нескольких часов для частиц диаметром более 10 мкм до более 10 дней для субмикрометрических частиц [43].

Следует отметить также, что и концентрация частиц пыли снижается с ростом высоты пылевой бури поскольку крупные пылинки не поднимаются высоко, а ионизация пыли из-за соударений отталкивает мелкие частицы пыли от Земли в большей степени чем крупные частицы. Для количественной оценки влияния пыли на распространение радиоволн и на их поглощение необхо-

димо учитывать вертикальное распределение пыли в воздухе (вертикальный профиль) и характеристики подстилающей поверхности.

Впервые зависимость концентрации пыли от высоты была экспериментально определена в работе [39].

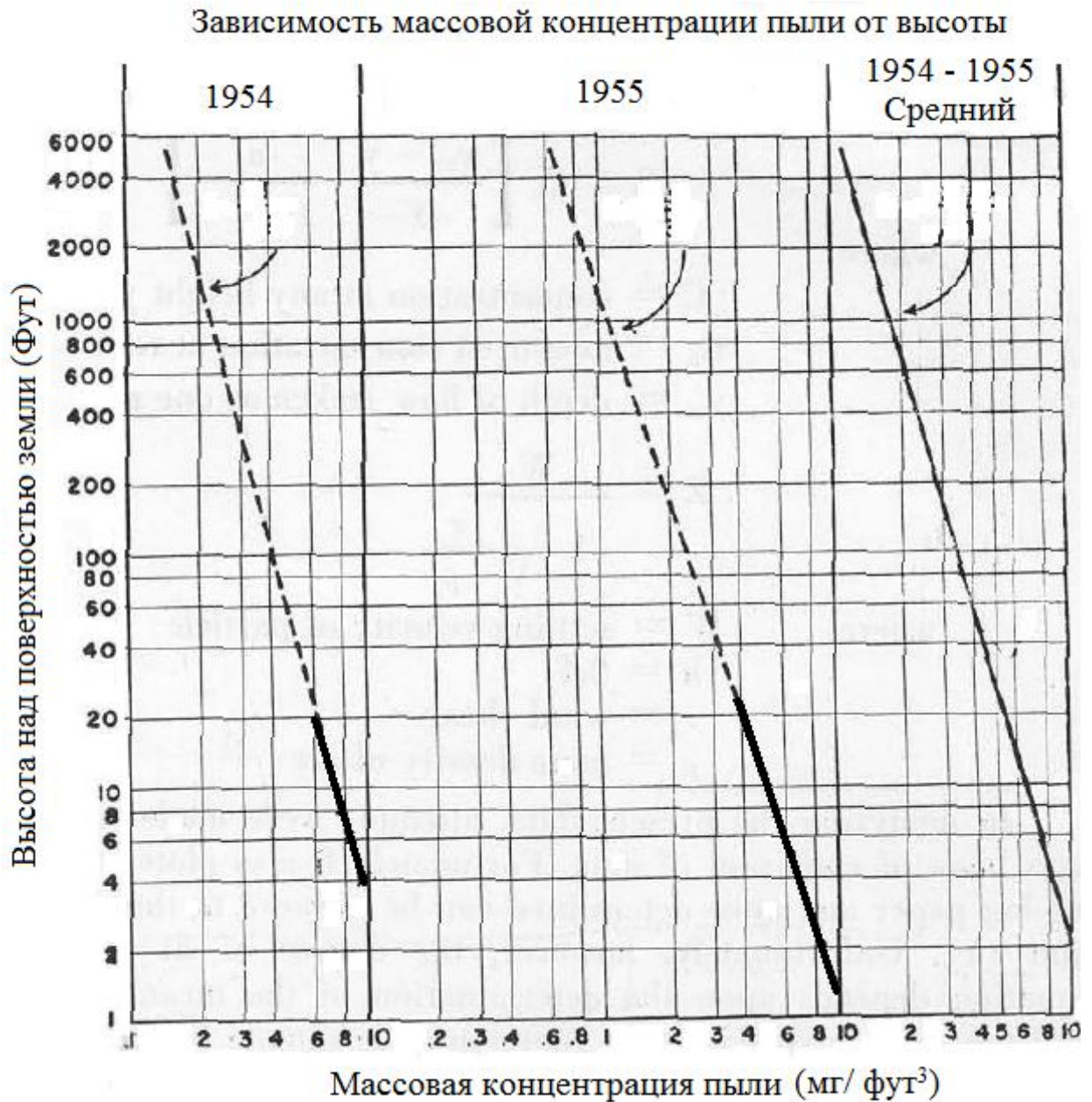


Рис. 2.14. Измеренная и спрогнозированная средняя эквивалентная концентрация пыли на различных высотах для некоторых пыльных бурь 1954 и 1955 годов в штатах Канзас и Колорадо США [39].

Многие метеорологи во всем мире фиксируют видимость, чтобы указать на относительную тяжесть пыльных бурь. Такие записи доступны уже много лет на разных станциях. Значительные измеренные данные о видимости во время пыльных бурь имеются и у Иракской метеорологической организации (Багдад) за с 2016 по 2020 год. Эти данные получены на следующих станциях:

- Станции Басра, Ди-Кар и Мутана на юге Ирака.
- Станция Аль-Анбар в западном регионе страны.
- Станции Международного аэропорта Багдада и станция Кадисия в центральных районах Ирака.
- Станция Диятла в восточном регионе Ирака.
- Станции Ниневия и Киркук в северных районах страны.

Имеющиеся реальные данные можно использовать для определения концентрации пыли (массы пыли на кубический метр воздуха [47]) в атмосфере.

Отношение концентрации пыли к количеству пылевых частиц, оседающих под действием гравитации, является константой K , так как не зависит от общего числа частиц N

$$K = \frac{M}{\sigma} \quad (2.8)$$

где: M – концентрация пыли, [кг/м³];

σ – количество частиц, оседающих под действием гравитации.

Отсюда

$$\sigma = \frac{M}{K} \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) справедливо для условий плохой видимости, и подставляя его в соотношение Кошмидера [44], связывающее видимость с измеренным ее ослаблением, получим выражение для видимости:

$$V = \frac{3.912}{\sigma} = \frac{3.912K}{M} \quad (2.10)$$

Данные о видимости во время пыльных бурь в различных городах Ирака приведены в приложении 1.

Изучение влияния пылевых бурь на работу спутниковых линий связи Земли требует знания изменения видимости с высотой. Влияние высоты на видимость является одним из существенных факторов, которые обычно учитываются при вычислении параметров распространения радиосигнала в пыльной среде. Зависимость видимости от высоты получена в результате многочисленных экспериментов [39] и эмпирическое уравнение имеет следующий вид.

$$V = V_0 \left[\frac{h}{h_0} \right]^{0.26} \quad (2.11)$$

где: V - видимость (км) на любой высоте h (км), связанная с эталонной видимостью V_0 (км) на эталонной высоте h_0 (км).

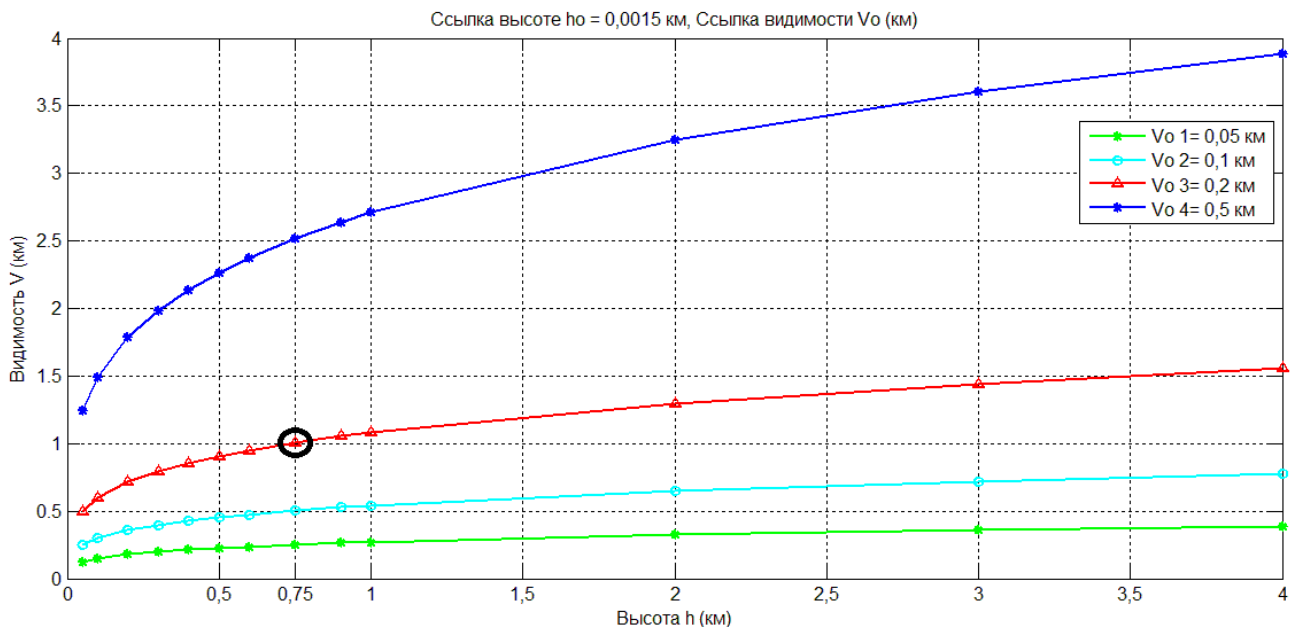


Рис. 2.15. Изменение видимости с высотой для различной исходной видимости

Из зависимостей, приведенных на рис. 2.15, следует, что:

- Видимость вдоль пути распространения не является постоянной, потому что с увеличением высоты видимость также увеличивается, хотя и очень незначительно, для различных эталонных видимостей.

- Эталонная видимость постепенно изменяется (от $V_0 = 0,05$ км, 0,1 км, 0,2 км до 0,5 км), видимость также увеличивается.

- Во время пыльной бури, когда исходная видимость равна и превышает 0,2 км ($V_0 \geq 0,2$ км), видимость становится больше 1 км ($V > 1$ км), поэтому влияние бури становится пренебрежимо малым на высоте более $h > 0,75$ км.

Выводы по главе 2.

1. Максимальное ослабление радиосигналов спутниковой связи вызвано большой протяженностью линии между КА и наземным терминалом (ослабление в свободном пространстве) и является детерминированной величиной.

2. Газы атмосферы, гидрометеоры, пыльные и песчаные бури, ионосфера и радиационные пояса Земли вносят по сравнению с ослаблением в свободном пространстве значительно меньшее ослабление сигнала, но величины этих ослаблений стохастически меняются и зависят от многих случайных во времени факторов.

3. Предложена классификация пыльных бурь, основанная на экспериментальных данных по наблюдению таких явлений в Ираке за последние годы от 2016 до 2020 гг.

4. Предложенная классификация позволяет дифференцировано учитывать влияние пылевых и песчаных бурь на радиосвязь.

5. Рассмотрены составляющие пыльных образований и их зависимость от скорости ветра и высоты.

6. Предложен критерий (оптическая видимость), позволяющий рассчитывать влияние пыльных бурь на радиосвязь в атмосфере.

Глава III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

§ 3.1. Ослабление сигнала спутниковой связи в свободном пространстве

Потеря радиосигнала на пути по существу представляет собой уменьшение плотности мощности электромагнитной волны или сигнала по мере его распространения в среде, в которой он движется [57].

В телекоммуникационной системе существует множество причин потерь в среде передачи, которые могут возникнуть: потери в свободном пространстве, дифракция, многолучевость, потери на поглощение, рассеяние, зависимость от угла места антенны, вращения поляризации в ионизированных слоях, зависимость от гидрометеоров и т.д. [58].

Потеря свободного пространства происходит, когда сигнал проходит через пространство без каких-либо других эффектов, ослабляющих сигнал. Все равно его энергия будет уменьшаться по мере распространения. Это можно рассматривать как сигнал радиосвязи, распространяющийся по все увеличивающейся сфере. Поскольку сигнал должен охватывать более широкую область, сохранение энергии говорит нам о том, что энергия в любой данной области будет уменьшаться по мере увеличения охватываемой области [59].

Потеря в свободном пространстве, это потеря мощности сигнала электромагнитной волны, которая возникает в результате прохождения прямой видимости через свободное пространство (обычно космос), при отсутствии поблизости препятствий, которые могли бы вызвать отражение или дифракцию. Эти потери не включают такие факторы, как коэффициент усиления антенн, используемых в передатчике и приемнике, а также любые потери, связанные с несовершенством аппаратного обеспечения [60].

Потери в свободном пространстве это ослабление радиосигнала между точками питания двух антенн (передающей и приемной), возникающее в ре-

зультате сочетания зоны захвата приемной антенны и свободного от препятствий пути прямой видимости через свободное пространство [61].

Хотя в расчетах бюджета связи часто используется только потери в свободном пространстве, важно понимать, что в данном контексте термин “свободное пространство” понимается буквально. То есть нет атмосферы и отражающих поверхностей или препятствий любого типа. Это не представляет реалистичной среды для наземных каналов и для многих сценариев радиолиний, так как использование одной только потери в свободном пространстве не приведет к реалистичному бюджету канала [62].

Потери в свободном пространстве являются доминирующей составляющей в потере силы сигнала. Для выполнения всех обязательных расчетов бюджета мощности канала для любого спутника необходимо учитывать ключевой компонент - Эквивалентную изотропную излучаемую мощность (ЭИИМ), которую можно считать входной мощностью на одном конце канала. Эквивалентная изотропная излучаемая мощность вводится в начале всех расчетов, чтобы можно было понять источник каждого компонента и обеспечить правильное понимание всех представленных выводов [63, 64], как показано в уравнении (3.1).

$$\text{ЭИИМ} = P_T G_T \text{ , (Вт)} \quad (3.1)$$

где: P_T - передаваемая мощность в (Вт), G_T - коэффициент усиления передающей антенны в (дБи).

Максимальная плотность потока мощности на расстоянии R определяется следующим выражением

$$\Psi_M = \frac{P_T G_T}{4 \pi R^2} \quad (3.2)$$

где: Ψ_M - максимальная плотность потока мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$), R - расстояние между спутником и приемной станцией (м).

Первым шагом в расчетах потерь на пути в свободном пространстве является определение потерь в условиях ясного неба. Это потери, которые остаются постоянными во времени. Как было сказано ранее, потери в свободном

пространстве происходят из-за распространения сигнала в пространстве с расширением луча распространения.

Полученная мощность определится как

$$P_R = \psi_M \cdot A_{\text{eff}} \quad , \quad (\text{Вт}) \quad (3.3)$$

где: P_R - принимаемая мощность, A_{eff} - эффективная площадь приемной антенны.

Эффективная площадь приемной антенны обеспечивается соотношением между эффективной площадью антенны и коэффициентом усиления приемной антенны, как показано в уравнении (3.4):

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2 G_R}{4 \pi} \quad (3.4)$$

где: A_{eff} - эффективная площадь приемной антенны (м^2), λ - длина волны радиосигнала в (м), G_R - коэффициент усиления приемной антенны в (дБ) [58].

Итак, полученная мощность рассчитывается путем подстановки уравнений (3.2) и (3.4) в уравнение (3.3):

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4 \pi R^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_R}{4 \pi} = (P_T G_T)(G_R) \left(\frac{\lambda}{4 \pi R} \right)^2 \quad (3.5)$$

Удобный способ выразить уравнение (3.5) в децибелах, взяв 10-кратный логарифм этого уравнения

$$\begin{aligned} P_R \text{ (dB)} &= P_T G_T + G_R + 10 \lg \left(\frac{\lambda}{4 \pi R} \right)^2 = \\ &= P_T G_T + G_R - 20 \lg \left(\frac{4 \pi R}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

В этом уравнении $P_T G_T$ относится к передатчику, G_R относится к приемнику, а последний член второго члена относится к потерям на пути распространения свободного пространства.

Так как расстояние в спутниковой связи большое перейдем к километрам

$$\lambda \text{ (m)} = \frac{c \text{ (m/s)}}{f \text{ (Hz)}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)}}{f \text{ (Hz)}}; \quad \lambda \text{ (km)} = \frac{c \text{ (km/s)}}{f \text{ (MHz)}} = \frac{0,3 \text{ (km/s)}}{f \text{ (MHz)}} \quad (3.7)$$

где: λ - длина волны радиосигнала в (км), C - скорость света (км/с), а f - несущая частота (МГц).

Потери на пути в свободном пространстве определяются уравнением (3.8):

$$L = 20 \lg \left(\frac{4 \pi R}{\lambda} \right) \quad (3.8)$$

Подставляя уравнение (3.7) в уравнение (3.8), тогда потери в свободном пространстве будут равны:

$$\begin{aligned} L &= 20 \lg \left(\frac{4 \pi R f}{c} \right) = 20 \lg \left(\frac{4 \pi}{0,3} R f \right) = \\ &= 20 \lg \left(\frac{4 \pi}{0,3} \right) + 20 \lg R + 20 \lg f \\ &= 32,4 + 20 \lg R + 20 \lg f \end{aligned} \quad (3.9)$$

Мы будем использовать уравнение (3.9) для расчета потерь свободного пространства для следующих типов спутников, как показано на рисунках 3.1, 3.2 и 3.3., то есть для спутников на околоземных орбитах, на орбитах навигационных спутников и для геостационарной орбиты.

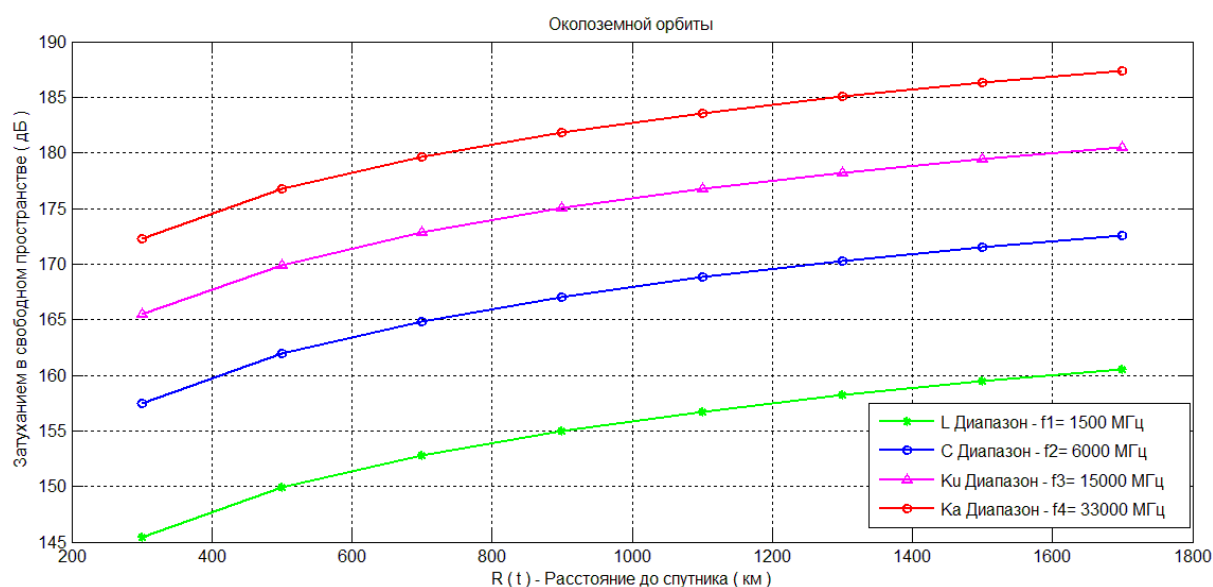


Рис. 3.1. Расчет потерь в свободном пространстве для низкоорбитальных спутников

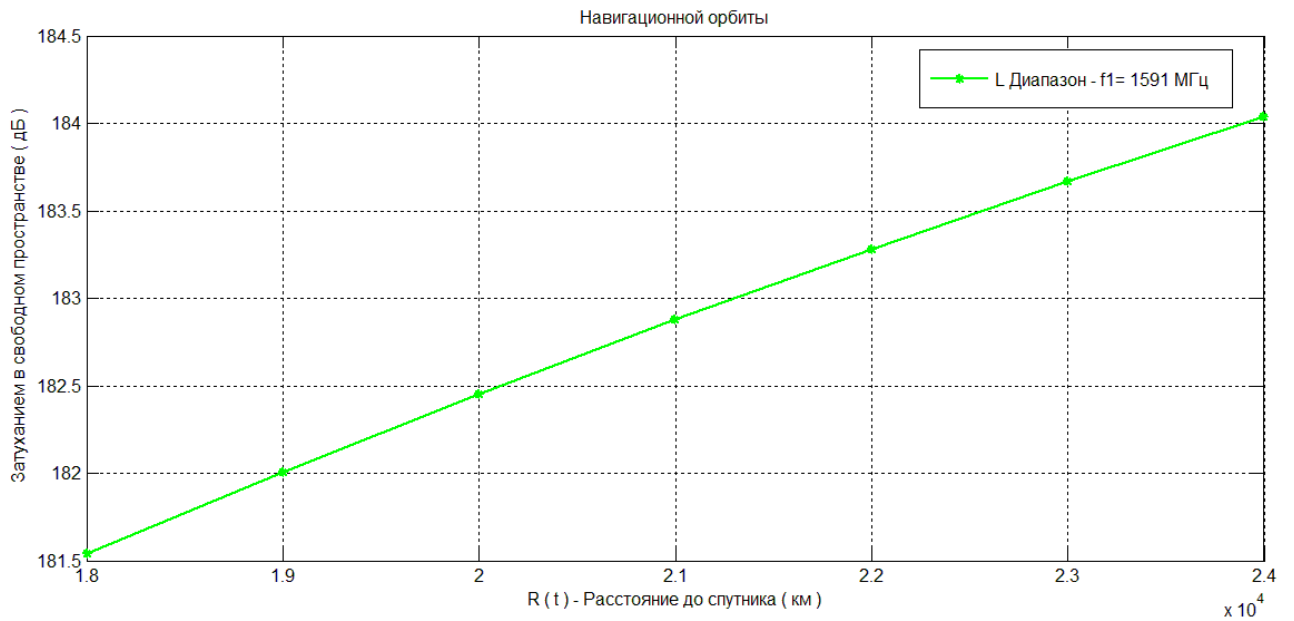


Рис. 3.2 Расчет потерь свободного пробега для навигационных спутников

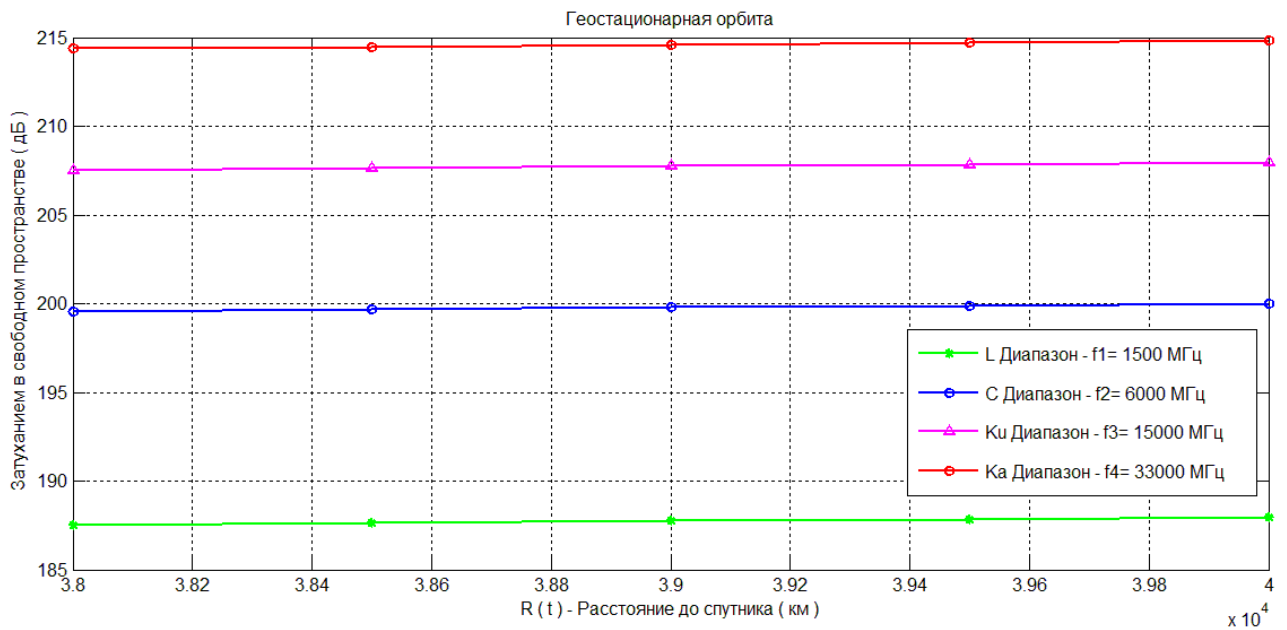


Рис. 3.3 Расчет потерь свободного пробега для геостационарных спутников

§ 3.2. Ослабление сигнала в атмосфере Земли

Современные системы требуют более высоких скоростей передачи данных и возможностей пропускной способности по требованию. Эти требования в сочетании с отсутствием частотного пространства в полосе Ku и ниже вынуждают разработчиков систем переходить в полосу Ka (30/20 ГГц). Значительные потери при использовании высокочастотных диапазонов, особенно тех, которые превышают 10 ГГц, возникают при прохождении сигналов через атмосферу. Тропосферные эффекты - в первую очередь дождь, но также облака, водяной пар и кислород - вызывают снижение мощности сигнала за счет рассеяния и поглощения [65].

С освоением более высокочастотных диапазонов спутниковой связи роль атмосферных воздействий на пути распространения сигналов приобретает все большее значение. Ухудшающие факторы дождя всегда учитывались при проектировании линий связи на частоте выше 10 ГГц. Однако водяной пар, облака и кислород считались вторичными эффектами ухудшения уровня сигнала [65].

Пересекая атмосферу радиосигнал претерпевает значительное ослабление. Радиоволны рассеиваются на турбулентностях тропосферы, отражаются от различных по температуре слоев атмосферы, затухают в газе, облаках, в дожде и в других гидрометеорах. В тропосфере и стратосфере Земли радиоволны теряют свою энергию главным образом из-за потерь в атмосферных газах и из-за поглощения, ослабления и рассеяния в облаках, ослабления из-за дождя, снега, града, тумана и других гидрометеоров [4]. Отражение от границ раздела слоев атмосферы и рассеяние на турбулентностях создают многолучевость. Это приводит к интерференционным замираниям амплитуды и фазы распространяющегося сигнала [66].

Тропосфера состоит из множества молекул газов и различных соединений, таких как град, капли дождя или тучи. Радиоволны, проходящие через тропосферу, подвергаются их воздействию и будут рассеиваться, деполяризо-

вываться, поглощаться и, следовательно, ослабляться [64]. Рассмотрим математическую модель атмосферного воздействия на радиоволны.

Ослабление радиосигналов из-за атмосферных газов. Частотные ограничения и возрастающие требования по увеличению скорости передачи информации и сокращению временных задержек сигналов при распространении стимулируют использование частот миллиметрового диапазона (ММД). Рассмотрим возможность использования частот ММД на радиолиниях связи низкоорбитальных КА со среднеорбитальными и геостационарными КА. Основным недостатком ММД состоит в том, что в атмосферных условиях сигналы ММД интенсивно затухают. Это вызвано как рассеянием миллиметровых волн на неоднородностях атмосферы, так и резонансным поглощением энергии волн молекулами кислорода и воды [67]. Молекулы воды и кислорода обладают электрическими и магнитными моментами, резонирующими на определенных частотах ММД, что вызывает интенсивное поглощение энергии радиоволн [68, 69]. Кислород и водяной пар в нижней части атмосферы, называемой тропосферой, существенно влияют на ослабление сигналов на частотах выше 3 ГГц.

Математическая модель затухания радиосигналов в газах атмосферы. Такую математическую модель можно построить на основе методов оценки затухания на наклонных траекториях в атмосфере с использованием:

- а) Оценки затухания в газах атмосферы, рассчитываемого путем суммирования отдельных линий поглощения, что действительно для диапазона частот 1-1000 ГГц;
- б) Приближенного метода оценки газового затухания, примененного в диапазоне частот 1-350 ГГц [67].

Постоянная ослабления или поглощения определяется для кислорода и водяного пара и обычно имеет единицы измерения дБ/км. Результирующее ослабление для частот миллиметрового диапазона может превышать уменьшение мощности из-за потерь в свободном пространстве. Приблизительные

выражения для констант затухания кислорода и воды (в дБ/км), как определено Международным союзом электросвязи (МСЭ), являются [70]:

Для кислорода

$$L_o = \begin{cases} 0,001 \left[0,00719 + \frac{6,09}{f^2+0,227} + \frac{4,81}{(f-57)^2+1,5} \right] f^2, & f < 57 \text{ ГГц} \\ L_o(57 \text{ ГГц}) + 1,5 (f - 57), & f \geq 57 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (3.10)$$

где: L_o - постоянная затухания кислорода в (дБ/км), f - несущая частота в (ГГц).

Для воды

$$L_w = 0,0001 \left[0,05 + 0,0021\rho + \frac{3,6}{(f-22,2)^2+8,5} + \frac{10,6}{(f-183,3)^2+9} + \frac{8,9}{(f-325,4)^2+26,3} \right] f^2 \rho, \quad (3.11)$$

$f < 350 \text{ ГГц}$

где: L_w - постоянная ослабления водяного пара в (дБ/км), ρ - плотность водяного пара в г/м³ (обычно 7,5 г/м³ на уровне моря).

Для горизонтальных путей распространения константы затухания достаточно постоянны, а общее затухание просто определяется путем умножения константы затухания на расстояние пути R в (км):

$$L = (L_o + L_w) R = L_a R \quad (\text{дБ}) \quad (3.12)$$

В общем случае константы затухания являются функциями высоты, поскольку они зависят от таких факторов, как температура и давление. Часто предполагается, что эти величины изменяются экспоненциально с высотой h . Например, в рекомендациях МСЭ предложена методика, учитывающая изменения давления и температуры с ростом высоты от наземной антенны:

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/h_s} \quad (3.13)$$

где: ρ_0 - плотность водяного пара на уровне поверхности Земли, соответствующей уровню моря; h_s - известна как высота шкалы, которая обычно составляет 1-2 км.

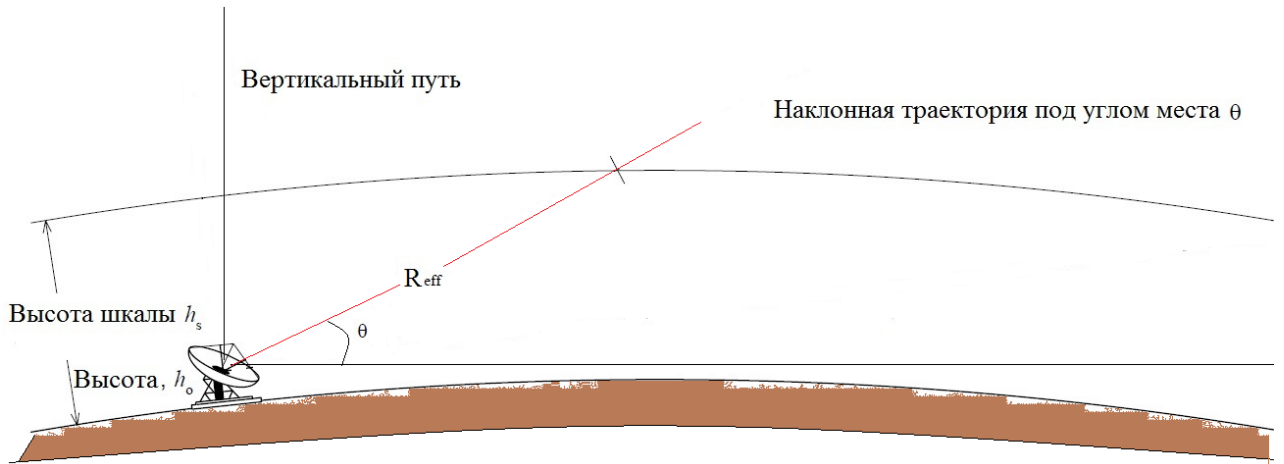


Рисунок 3.4 Высота шкалы и наклонные траектории

Однако для вертикальных линий связи (например, для связи между земной станцией и спутником в зените) затухание значительно варьируется вдоль пути распространения. Ослабление в зависимости от высоты может быть приблизительно смоделировано как:

$$L_a(h) = L_{ao} e^{-h/h_s} \quad (3.14)$$

где: L_{ao} - постоянная затухания для максимальной высоты от спутника до уровня моря Земли.

Общее затухание вдоль вертикальной траектории можно найти как:

$$L = \int_{h_0}^{h_1} L_{ao} e^{-z/h_s} dz = \int_{h_0}^{\infty} L_{ao} e^{-z/h_s} dz \quad (3.15)$$

Интеграл берется от h_0 , высоты нижней станции, до более высокой станции h_1 . Предполагается, что последнее равно бесконечности. Это дает следующее выражение для общего ослабления для вертикальных связей:

$$L = L_{ao} h_s e^{-h_0/h_s} \quad (3.16)$$

Сравнивая это с уравнением (3.12) выше, мы видим, что $R_{eff} = h_s e^{-h_0/h_s}$ представляет эквивалентную длину пути, что позволяет нам записать

$$L = L_{ao} R_{eff} \quad (3.17)$$

Для наклонных атмосферных траекторий эффективная длина может быть найдена с использованием геометрии, показанной на рисунке 3.4, как

$$L = \int_{h_0}^{\infty} L_{ao} e^{-z/h_s} \sin \theta dz = L_{ao} R_{eff} \sin \theta \quad (3.18)$$

где: θ - обозначает угол места, то есть угол между горизонталью и направлением на спутник

Можно рассчитать длину наклонной траектории (R) в атмосфере по следующему уравнению (3.19)

$$\sin \theta = \frac{h}{R} \quad (3.19)$$

где: h - высота атмосферы (км), R - длина наклонного пути в атмосфере, θ - угол места.

На рисунке 3.5 показано соотношение между длиной траектории радиосигнала в атмосфере и углом места.

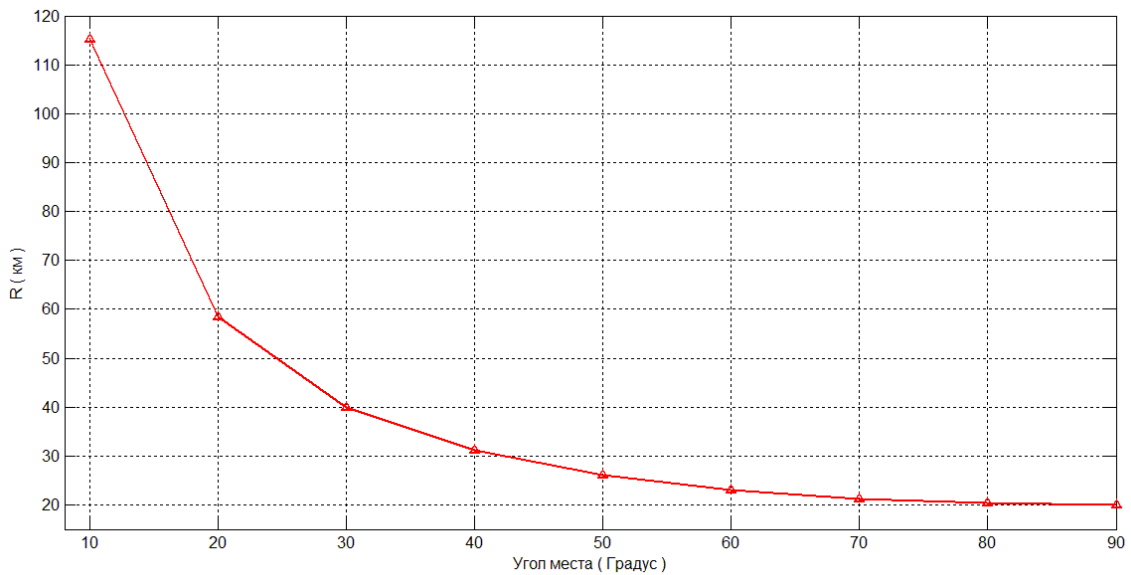


Рис. 3.5. Длина наклонной траектории в зависимости от угла места.

Для спутниковых систем ослабление может играть важную роль в определении общего бюджета связи системы. Удельное затухание радиоволн в атмосферных газах, в соответствии с [67] показано на рисунке 3.6.

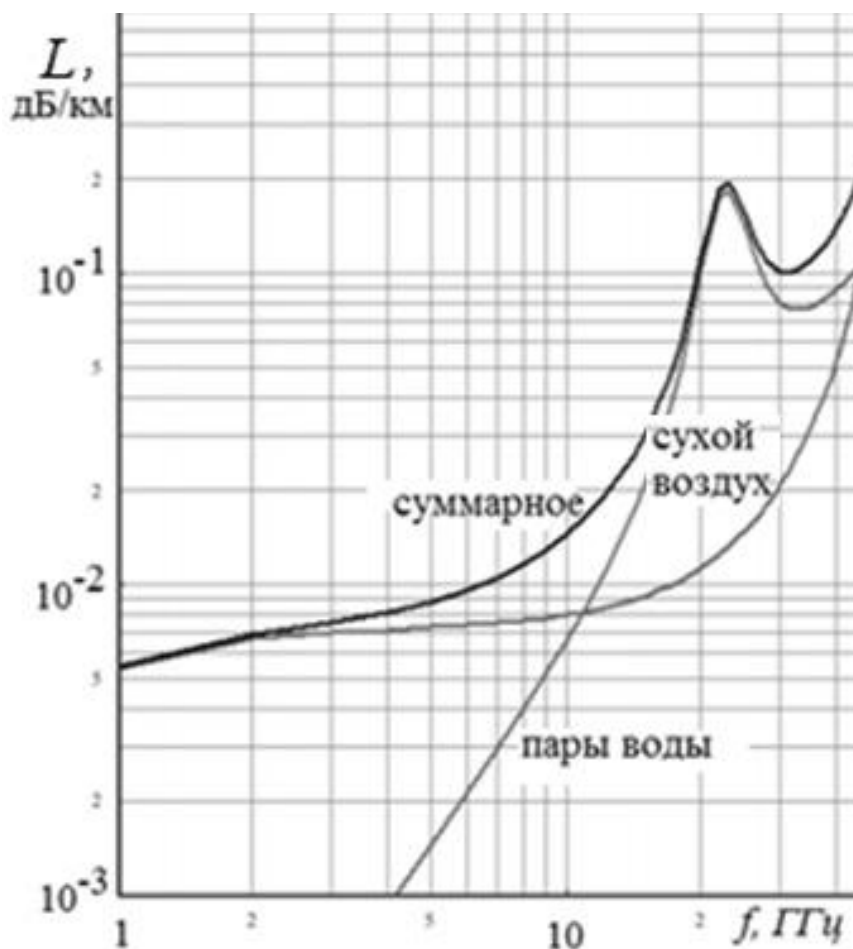


Рисунок 3.6. Удельное затухание радиоволн в атмосферных газах [67]

Поглощение электромагнитных волн в газах атмосферы в зависимости от частоты имеет ярко выраженный нелинейный характер. При этом на определенных частотах наблюдаются выбросы затухания. Выбросы затухания можно объяснить резонансными явлениями в молекулах кислорода и воды на этих частотах [66].

На частотах 22,2 ГГц и 180 ГГц происходит значительное ослабление сигналов из-за поглощения в воде, а на частотах 60 ГГц и 118,8 ГГц из-за поглощения молекулами кислорода [67]. Но между низкоорбитальными и геостационарными КА нет водяного пара, а в сверхразреженной атмосфере молекулы кислорода встречаются редко. Поэтому частоты ММД с экстремальным затуханием в атмосфере можно использовать для передачи информации с низкоорбитальных КА на геостационарные. При этом наземные источники не смогут создать ощутимую помеху низкоорбитальным КА из-за поглощения

частот ММД в атмосфере. В свою очередь и сигналы КА на этих частотах миллиметрового диапазона не создадут помех наземным радиосредствам. С геостационарных КА информацию не сложно передать абонентам на Землю, используя штатные транспондеры [68].

В нормальных условиях только кислород и водяной пар вносят значительный вклад в поглощение. Другие атмосферные газы становятся проблемой только в условиях очень сухого воздуха на частотах выше 70 ГГц [64].

Согласно рисункам 3.5 и 3.6 можем рассчитать затухание в сухом воздухе Ираке. Результаты расчета показаны на рисунке 3.7.

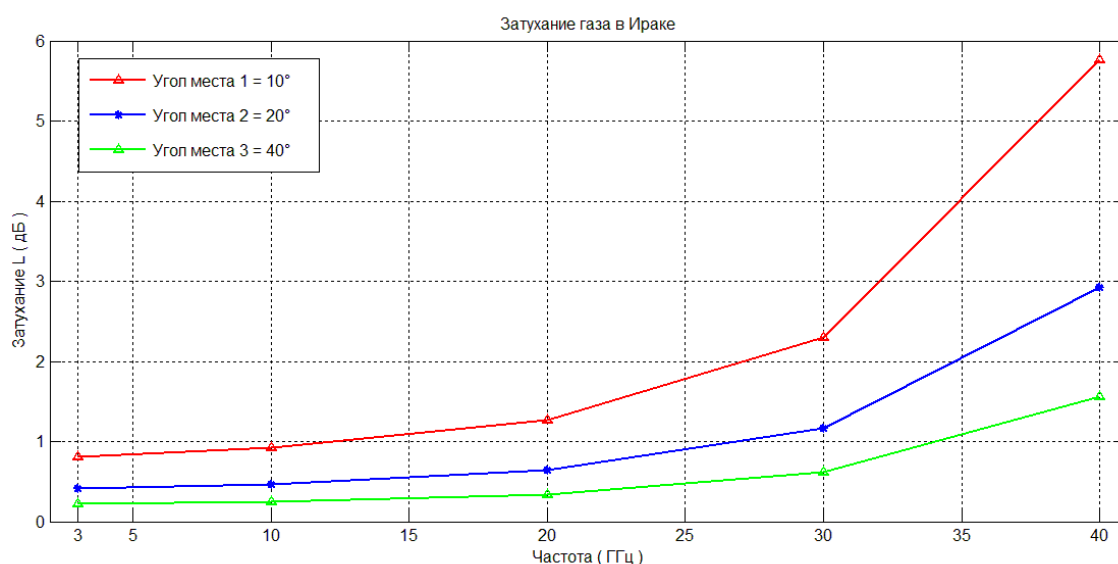


Рисунок 3.7. Затухание в сухом воздухе в Ираке

Затухание из-за атмосферных осадков и других гидрометеоров. В течение многолетних наблюдений показано, что ослабление радиочастотных сигналов напрямую связано со средней интенсивностью осадков на пути распространения сигналов.

Основными частицами-рассеивателями в тропосфере являются гидрометеоры, такие как капли дождя, град, лед, туман или облака, и эти частицы представляют проблему для частот выше 10 ГГц. Как поглощение, так и рассеяние возрастают с частотой сигнала [64].

Для спутников на геостационарной околоземной орбите выполнение этих расчетов становится обязательным, как только положение спутника относительно наземной станции становится постоянным [64].

Когда идет дождь на линиях связи геостационарных космических аппаратов (КА) с наземными станциями, наблюдается резкое снижение мощности радиосигналов на входе радиоприемников [74].

Дождь считается основной причиной затухания на частотах в диапазоне от 5 до 300 ГГц. Уровень спутникового сигнала снижается в условиях дождя. Присутствие капель дождя может серьезно ухудшить надежность и производительность линий связи [71]. Дождь ухудшает работу системы спутниковой связи, увеличивая шумовую температуру антенны земной станции. Антенна собирает шумы от Земли, от атмосферы (будь то облако или дождь) и от внеземных источников. Температура шума антенны зависит от угла возвышения, размера антенны, частоты и погодных условий [75].

Затухание из-за дождя и других гидрометеоров (туман, мокрый снег, град, изморось и др.) является функцией различных параметров, включая угол места, несущую частоту, долготу и широту земной станции и скорость выпадения гидрометеоров, то есть интенсивность осадков.

Однако основными параметрами являются распределение капель по размерам и количество капель, которые присутствуют в объеме, разделяемом волной с дождем. Важно отметить, что затухание определяется не количеством выпавшего дождя, а скоростью его выпадения [73].

К настоящему времени большинство негативных явлений, связанных с распространением радиоволн СВЧ, практически исследованы, что позволяет определять необходимый энергетический потенциал для их преодоления.

Экспериментальные исследования влияния гидрометеоров на радиоволны проводились многими исследователями в различных климатических зонах в различных условиях, включая проливные сильные ливни. Поглощение энергии сигнала при дождях и других гидрометеорах зависит от интенсивности

осадков. Основываясь на многочисленных экспериментах, результаты которых уточнены и обоснованы в [73], в [76] было показано, что коэффициент поглощения радиосигнала линейно возрастает с увеличением интенсивности дождя, и его зависимость от частоты может быть аппроксимирована выражением.

$$B_{д} = \left(\frac{f}{70} \right)^2 Y, [\text{дБ/км}] \quad (3.20)$$

где: Y - интенсивность дождя (мм/ч), f - несущая частота в (ГГц).

На основе модели ослабления, предложенной рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ-R P.837-5, МСЭ-R P.836-4, МСЭ-R P.2001-1) установлено, что Y зависит только от скорости выпадения осадков, измеряемой в миллиметрах в час. Высокая интенсивность осадков может привести к полному отключению связи. Если размер капель дождя в диаметре приближается к половине длины волны сигнала, сигнал будет сильно ослаблен. Поэтому более высокие частоты ослабляются больше чем низкие частоты из-за меньшей длины волны [73, 75].

Потери энергии сигнала, вызванные осадками, в том числе дождем, мокрым снегом и облаками, возникают на частотах выше 5 ГГц. Даже обычная облачность в Ku диапазоне частот ослабляет радиосигнал спутника практически на 0,1 дБ/км [76].

Исследования показывают, что наиболее заметное влияние гидрометеоров на распространение сигнала будет на частотах выше 70 ГГц, но процесс зависит от климатической зоны и сезона [76].

§ 3.3. Ослабление сигнала спутниковой связи из-за многолучевости

Существует множество причин, по которым может произойти потеря радиоканала: рассеяние радиоволн, многолучевость, потери на поглощение в атмосфере. При многолучевости сигналы достигают приемник по нескольким различным путям. Эти сигналы могут складываться или вычитаться друг из друга в зависимости от относительных фаз сигналов. Если приемник перемещен, сценарий изменится и принятый сигнал будет другим [77].

Ослабление энергопотенциала на линиях связи спутник-Земля объясняется главным образом многолучевостью и взвешенными частицами от дождя, снега или пыли [78]. Многолучевость приводит к интерференционным замираниям сигнала и к межсимвольной интерференции. Например, в Глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), таких как ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Бейдоу (Китай), Галилео (Евросоюз) многолучевость является одним из основных источников ошибок в точном позиционировании [81, 82].

Многолучевая ошибка не может быть устранена с помощью метода двойной дифференциации и ее трудно аналитически описать, что серьезно ограничивает применение высокоточного позиционирования ГНСС. Более того, многолучевое затухание из-за отражений от поверхности Земли для авиационных мобильных спутниковых систем отличается от затухания для других мобильных спутниковых систем, поскольку скорости и высоты самолетов намного больше, чем у других мобильных платформ [81].

Эффект многолучевости является одним из основных источников ошибок в точном позиционировании ГНСС. При измерениях ГНСС приемники не только принимают прямые сигналы, передаваемые спутниками, но также неизбежно принимают сигналы, отраженные или дифрагированные окружающими объектами. Прямые сигналы и отраженные сигналы накладываются друг на друга создавая сигналы помех, которые рассматриваются как стандартные сигналы. Поскольку длина пути распространения отраженных или дифрагированных сигналов обычно больше, чем прямого сигнала, сигналы помех приве-

дут к некоторым отклонениям в результатах определения дальности, что серьезно повредит точности позиционирования ГНСС [82].

Этот эффект возникает, когда приемник регистрирует не только прямые сигналы со спутника, но и косвенные сигналы, отраженные от земли или других препятствий на местности. Свойства таких сигналов существенно отличаются по сравнению с прямыми сигналами. Косвенные сигналы всегда покрывают большее расстояние, достигая приемника с определенной задержкой, и находятся в другой фазе по отношению к прямому сигналу, как показано на рисунке 3.8. В результате отражения амплитуда волны (и, возможно, ее поляризация и частота) также изменяется [77].

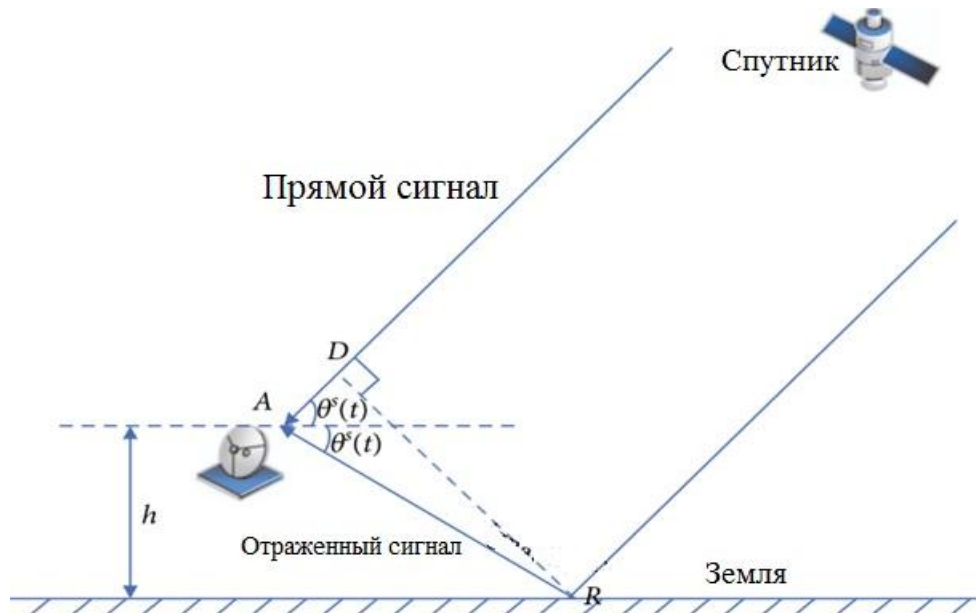


Рисунок 3.8. Многолучевая спутниковая связь

Поскольку приемник не может отличить прямой сигнал от отраженного, две волны интерферируют и форма прямого сигнала искажается. Это приводит к ошибкам наблюдения, а также искажениям параметра отношения сигнал / шум (ОСШ) [81,86].

Максимальное влияние многолучевости на точность фазы несущей волны определяется как четверть длины волны [82]. Это соответствует примерно

5 см для частот, используемых в системах GNSS. С другой стороны, влияние этого эффекта на измерение псевдодиапазона кода может быть намного больше. При исключительно неблагоприятных условиях погрешность может достигать 100 м [83]. Однако на практике использование точного измерительного оборудования сводит к минимуму такие ошибки.

Эффект многолучевости может быть значительно уменьшен на этапе регистрации сигнала приемником. Тщательно подобранный метод корреляции сигналов или расстояние между корреляторами значительно снижает влияние искажений сигнала, связанных с эффектом многолучевости. Обзор таких методов корреляции сигналов, обычно используемых производителями измерительного оборудования, был представлен Кальянараманом [84].

Методы устранения и идентификации многолучевого воздействия можно разделить на три группы [83]:

- а- Устранение эффекта многолучевости в рамках последующей обработки данных.
- б- Аппаратные методы (например, разнесенный прием).
- с - Соответствующий выбор места измерения.

Очевидный способ уменьшить многолучевость - выбрать подходящее место для проведения измерений вдали от препятствий на местности. Кроме того, размещение антенны непосредственно на земле может ограничить возможность приема волн, отраженных от поверхности.

Очевидно, что это решение имеет свои ограничения и редко может быть использовано на практике. Другим вариантом может быть использование маски горизонтальной высоты, настроенной в соответствии с фактическим окружением антенны. Другим методом, позволяющим устранить многолучевость, является анализ параметра отношения сигнал/шум для сигналов на нескольких различных частотах несущей волны. Этот метод использует преимущество того факта, что относительная фаза вторичного сигнала изменяется в зависимости от частоты измеряемого сигнала [85].

Также наблюдается, что затухание имеет характер, аналогичный многолучевому затуханию на наземных линиях связи. Как и распределение по наземным линиям связи, распределение для спутниковых линий связи с очень низким углом обзора также, по-видимому, коррелирует со статистикой градиента преломления. Общее распределение затухания показывает постепенный переход от распределения сцинтилляции при больших процентах превышения к распределению многолучевого затухания (с наклоном 10 дБ/декада) при малых процентах. При очень малых углах возвышения ($\leq 4^\circ$ на внутренних путях и $\leq 5^\circ$ на надводных или прибрежных путях) затухание из-за эффектов многолучевого распространения может быть особенно серьезным.

Поскольку размеры области отражения значительно превышают длину волны импульсного радиочастотного сигнала, отраженные сигналы от разных частей подстилающей поверхности будут поступать в приемник с разными амплитудами и фазами, что приведет к многолучевости и замираниям сигналов. Замирания влияют на вероятность правильного приема и также должны учитываться при расчете энергетического потенциала радиолинии: передатчик - подстилающая поверхность - приемник [87].

Простейшее распределение плотности вероятности Рэлея $w(H)$ часто принимается в качестве статистического описания затухания в радиоканалах, если оно сформировано двумя независимыми случайными величинами X и Y , имеющими нулевые математические ожидания и одинаковые отклонения [88]:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.21)$$

Замирание, описываемое распределением уравнения (3.21), неоднократно наблюдалось на радиолиниях, работающих в разных частотных диапазонах, в среднем в 60% времени сеансов связи [91]. Поэтому такое описание замираний широко используется в математических моделях радиоканалов [89-91].

Модель передаточной функции многолучевых радиоканалов с более глубокими замираниями по сравнению с распределением Рэлея была предло-

жена Накагами, но она была слишком сложной для практического использования. Кловским Д.Д. была предложена более простая четырехпараметрическая модель замирания [90], которая оказалась более удобной для практического использования. И хотя большую часть времени сеансов связи на линиях с отражениями наблюдается рэлеевское распределение затухания [91], более общей моделью является четырехпараметрическая модель распределения плотности вероятности [92].

Поскольку несколько отраженных волн интерферируют в точке приема, скорость затухания изменяется во времени по случайному закону, параметры которого зависят от количества волн, отраженных от подстилающей поверхности. Интерференционный сигнал $U_{in}(t)$ в точке приема формируется путем сложения большого количества волн, приходящих по разным путям и с разными задержками, в соответствии с моделью точечного рассеяния [2, 93, 94]. Для узкополосного излучаемого сигнала $U_{in}(t)$ сигнал на входе приемника будет:

$$U_{in}(t) = \int_S \mu_i U_n(t - t_i) \exp^{jw_0(t-t_i)} dS, \quad (3.22)$$

где: S - площадь, эффективно участвующая в переизлучении, μ_i - коэффициент отражения от i -й точки области отражения, t_i - общее время задержки во время распространения сигнала от передатчика до i -й точки и далее до приемника, w_0 - центральная частота излучаемого узкополосного сигнала.

Обычно предполагается, что отражательная способность μ_i мало зависит от частоты в довольно широком диапазоне. Переходные процессы в радиоканале из-за его дисперсионных свойств также не учитываются. Если разница между максимальным и минимальным значениями t_i на площади S меньше, чем полоса частот спектра сигнала, то взаимными фазовыми сдвигами частот-

ных составляющих комплексной огибающей можно пренебречь и форма волны не изменится после преобразования [87].

$$U_{in}(t) = U_n(t - t_{av}) \int_S \mu_i \exp^{jw_0(t-t_i)} dS, \quad (3.23)$$

где: t_{av} - некоторое значение, усредненное по задержке громкости,

$$\Delta t_i = (t - t_{av}).$$

Коэффициент передачи сложных каналов:

$$\mu = \int_S \mu_i \exp^{jw_0(t-t_i)} dS. \quad (3.24)$$

Его ортогональные компоненты:

$$\mu_x = \text{Re}\{\mu\}, \quad \mu_y = \text{Im}\{\mu\}.$$

Из формулы (3.24) следует, что компоненты μ_x и μ_y определяются путем объединения большого количества слагаемых. Интенсивность каждого элемента μ_i является случайной величиной.

При таких условиях выполняется Центральная предельная теорема, а компоненты μ_x и μ_y можно считать распределенными в соответствии с законом Гаусса с некоторым средним значением m_x и m_y дисперсиями σ_x^2 и σ_y^2 [91]. В общем случае значения μ_x и μ_y взаимно коррелируют. Однако, откладывая μ_x и μ_y вдоль осей ОХ и ОУ на определенной координатной плоскости и поворачивая систему координат на нужный угол, можно перейти к совместной плотности распределения двух новых независимых значений Х и Y.

$$w(X, Y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{(X - m_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(Y - m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (3.25)$$

где: m_x, m_y, σ_x и σ_y - новые параметры двух гауссовых распределений X и Y, полученных после вращения, при которых распределение модуля $|\mu_i|$ не меняется.

Такая модель достаточно хорошо описывает результат интерференции радиоволн на входе приемника, отраженных от повторных излучателей S распределенных по площади, включая наличие довольно интенсивной регулярной составляющей. Различные комбинации значений четырех параметров соответствуют различным особым характерным случаям. Распределение модуля $|\mu|$ определяется этими параметрами и описывается параметрическим выражением, называемым [90] четырехпараметрическим законом распределения вероятностей, который имеет вид:

$$\begin{aligned}
 w(H) &= \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2}\right) \times \\
 &\times \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{g=0}^{\infty} \frac{(2l+2g-1)! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^l m_y^{2g} \sigma_x^{2g}}{l!(2g)! 2^l \sigma_y^{2l+4g} m_x^{l+g}} \times \\
 &\times H^{l+g} I_{l+g}\left(H \frac{m_x}{\sigma_x}\right),
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

и фаза

$$\begin{aligned}
 w(\varphi) &= \frac{\sigma_x \sigma_y \exp\left(\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right)}{2\pi(\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)} \times \\
 &\times [1 + L[1 + F(\sqrt{2L})]\sqrt{\pi} \exp(L^2)],
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

где: H - модуль передаточной функции канала связи, $I_{l+g}(\cdot)$ - модифицированная функция Бесселя порядка $l+g$, $m_x, m_y, \sigma_x, \sigma_y$ - параметры четырехпараметрического распределения, $F(\cdot)$ - интеграл вероятности.

$$L = \frac{m_x \sigma_y^2 \cos \varphi + m_y \sigma_x^2 \sin \varphi}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi}}.$$

Четырехпараметрическая модель передаточной функции радиоканала включает в себя множество частных случаев распределений и при различных условиях выражение (3.26) вырождается в более простое, при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ распределение Рэлея (3.21).

При σ_x или σ_y равных нулю четырехпараметрический закон распределения вероятностей преобразуется в усеченно- нормальное распределение:

$$w(H) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{x,y} \sqrt{\pi}} \right) \exp \left(- \frac{H^2}{2\sigma_{x,y}^2} \right). \quad (3.28)$$

Оно отличается самой высокой плотностью амплитуды, что, в частности, приводит к наиболее глубоким замираниям огибающей радиосигнала и к большей вероятности ошибок по сравнению с распределением Рэлея.

Если $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ и $m_y \neq 0$ тогда уравнение (3-26) вырождается в обобщенное распределение вероятностей Рэлея:

$$w(H) = \left(\frac{H}{\sigma^2} \right) \exp \left(- \frac{H^2 + m_x^2}{2\sigma^2} \right) I_0 \left(m_x \frac{H}{\sigma^2} \right), \quad (3.29)$$

где: $I_0(\cdot)$ - это модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

С моментами:

$$m_i = (2\sigma^2)^{i/2} \Gamma \left(1 + \frac{i}{2} \right) {}_1F_1 \left(- \frac{i}{2}; 1; \frac{m_x^2}{2\sigma^2} \right), \quad (3.30)$$

где: $\Gamma[\cdot]$ - гамма-функция, ${}_1F_1[\cdot]$ - гипергеометрическая функция.

При $m_x = m_y = 0$ уравнение (3.26) вырождается в так называемое [89] подрелеевское распределение:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[- \frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right] I_0 \left[\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right], \quad (3.31)$$

С первым моментом:

$$m_1 = 4i \sqrt{\frac{\pi \sigma_x \sigma_y}{2}} P_{1/2} \left[\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2\sigma_x \sigma_y} \right], \quad (3.32)$$

где: $P_{1/2}[\cdot]$ - функция Лежандра первого рода/

И вторым моментом:

$$m_2 = 4i \sqrt{\frac{\sigma_X^2 \sigma_Y^2}{\pi(\sigma_X^2 - \sigma_Y^2)}} Q_{-\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} \left[\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{\sigma_X^2 - \sigma_Y^2} \right], \quad (3.33)$$

где: $Q_{-\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}}[\cdot]$ - связанная функция Лежандра второго рода.

Принимая во внимание вышесказанное, коэффициент K определяется как:

$$K = kH, \quad (3.34)$$

где: k - коэффициент отражения радиосигнала от подстилающей поверхности, H - модуль передаточной функции радиоканала.

Многолучевость приводит к интерференционным замираниям, а использование при описании замираний спутниковых радиосигналов четырехпараметрического закона распределения вероятностей позволяет более корректно, по сравнению с релеевским описанием, определять необходимый запас энергopotенциала при проектировании спутниковых линий связи с Землей.

§ 3.4. Ослабление сигнала на радиолиниях Спутник-Земля из-за пылевых и песчаных бурь

Распространению радиоволн во время пыльных бурь уделяется большое внимание в связи с увеличением числа спутниковых линий связи, развернутых в регионах, где наблюдаются пыльные бури. В этом параграфе исследуется ослабление радиосигналов из-за пыльных бурь в Ираке на линиях связи спутник - Земля.

В качестве критерия оценки состояния пыльной бури примем величину оптической видимости, которая легко измеряется на практике. При этом важно учитывать изменение видимости в атмосфере с ростом высоты и угла наклона радиолуча (угол места) земной станции относительно горизонтали при направлении максимума диаграммы направленности антенны на спутник [34, 47, 68].

В наземных линиях связи видимость может быть постоянной на всем пути прохождения сигнала, а угол места θ равен нулю относительно горизонтали. Однако, на линиях связи со спутниками постоянная затухания зависит от высоты, поскольку видимость и эквивалентный радиус частиц пыли также зависят от высоты. Мелкие пылинки находятся на большей высоте не притягиваясь Землей дольше по сравнению с крупными пылинками.

Затухание на наземной линии связи. Коэффициент ослабления микроволнового излучения, распространяющегося через атмосферу, наполненную сферическими частицами пыли был получен в работе [95] в зависимости от видимости и определен как:

$$\alpha = 2,573 \times 10^{-3} \frac{F}{V^\gamma} \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2} \right) \quad [\text{дБ/км}] \quad (3.35)$$

где: F - частота (ГГц), V - видимость во время пыльных бурь (км), Im - мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости частиц пыли, ε_m^* - комплексная диэлектрическая проницаемость частиц, γ - постоянная.

Влияние высоты на видимость. Существенное различие между влиянием пыльных бурь на наземные линии связи и линии связи Земля-спутник заключается в изменении видимости с высотой. Изучение влияния пыльных бурь на работу спутниковых линий связи с Землей требует знания изменений видимости с высотой. Зависимость видимости от высоты получена в результате многочисленных экспериментов в работах [47, 34], и эмпирическое уравнение имеет следующий вид

$$V^\gamma = V_0^\gamma \left[\frac{h}{h_0} \right]^b \quad (3.36)$$

где: V - видимость (км) на любой высоте h (км), связанная с эталонной видимостью V_0 (км) на эталонной высоте h_0 (км), γ – постоянная, зависящая от климата и состава пыли, b - зависимость концентрации пыли от высоты [39].

Согласно данным Национального центра атмосферных исследований США [97] отмечается, что к климатическим условиям Ирака может быть применено значение коэффициента $\gamma = 1,07$. Среднее значение константы b для Ирака было определено как $b = 0,28$. Инструкции по установке иракских метеорологических станций за опорную высоту принимают высоту $h_0 = 1,5$ м. Если подставить значения этих двух констант b и h_0 в уравнение (3.36), то изменение видимости с высотой определится как

$$V^\gamma = 6,175 V_0^\gamma h^{0,28} \quad (3.37)$$

где: размерность V , V_0 , и h - в км.

Математическая модель затухания из-за пылевых бурь на линии спутник-Земля. Математическую модель ослабления для линий связи спутник - Земля в Ираке будем разрабатывать на основе изменения оптической видимости в атмосфере во время песчаных и пыльных бурь.

Исследуем затухание на линии связи Земля–спутник во время пыльных бурь, на основании предложенной модели с учетом видимости, угла места и опорной высоты.

Коэффициент затухания для различной высоты h может быть получен путем подстановки выражения (3.37) в (3.35):

$$\alpha = 0,4166 \times 10^{-3} \frac{F}{V_0^\gamma h^{0,28}} \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2} \right) \quad [\text{дБ/км}] \quad (3.38)$$

Если рассматривать траекторию Земля-спутник с углом места θ и плотностью концентрации пыли, изменяющейся с высотой h , то общее затухание в линиях связи спутник - Земля может быть выражено следующим образом:

$$A_m = \frac{\int_0^{h_1} \alpha(h) dh}{\sin \theta} \quad [\text{дБ}] \quad (3.39)$$

где: h_1 - высота песчаных и пылевых бурь (км), θ - угол места (градусы), а траектория распространение электромагнитной волны (путь L) показана на рис. 3.9.

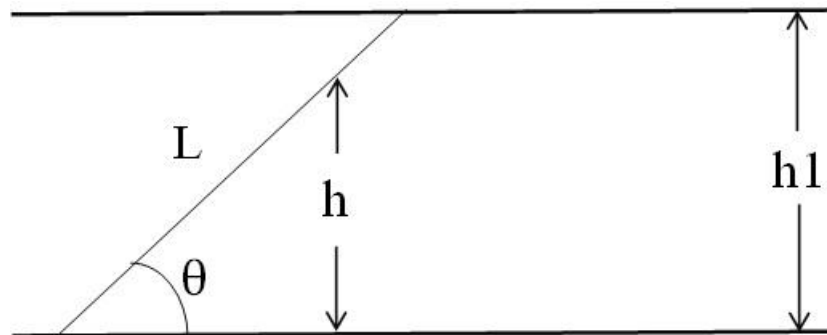


Рис. 3.9. Распространение электромагнитных волн на линии L в каналах связи Земля–спутник

Подставляя уравнение (3.38) в (3.39) и выполнив интегрирование, получим полное затухание радиосигнала в пылевой буре A_m , которое определится как:

$$A_m = 0,578 \times 10^{-3} \frac{F h_1^{0,72}}{V_0^\gamma \sin \theta} \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2} \right) \quad [\text{дБ}] \quad (3.40)$$

где: γ - безразмерная постоянная, зависит от состава пыли в пыльной буре и климатических условий [34, 96]. Для Ирака $\gamma = 1,07$, согласно [97].

Уравнение (3.40) позволяет рассчитывать затухание СВЧ сигналов на линиях связи спутник - Земля во время пылевых бурь. Реальные данные о видимости во время пыльных бурь и высоте пыльных бурь получены от Иракской метеорологической организации для нескольких городов страны и охватили период с 2016 по 2020 год. Значения комплексной диэлектрической проницаемости частиц ϵ_m^* зависят от частоты [98], их примеры приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Значения комплексной диэлектрической проницаемости частиц на различных частотах

Частота (ГГц)	Комплексная диэлектрическая проницаемость частиц ϵ_m^* в сухой пыли
10	5,26 - j 0,26
14	5,5 - j 1,3
24	5,1 - j 1,4
37	4,0 - j 1,3

Используя уравнение (3.40) и значения комплексной диэлектрической проницаемости частиц, приведенные в таблице 3.1, рассчитаем связь между общим затуханием и эталонной видимостью для различных частот при $h_1 = 2$ км, $\theta = 30^\circ$, $F = 10, 14, 24$, и 37 ГГц.

Результаты расчета приведены на рис. 3.10, на примере пыльной бури высотой 2 км, наблюдавшейся в Центральном регионе Ирака, в городе Багдаде в июне 2016 г.

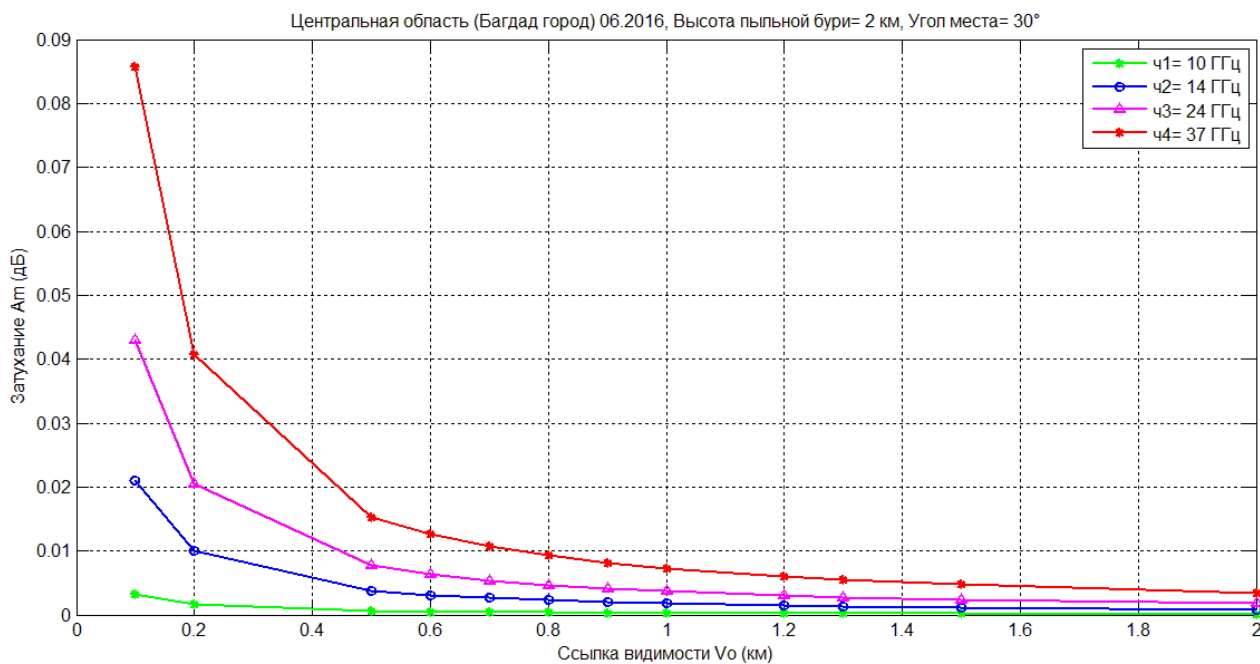


Рис. 3.10. Влияние частоты на затухание радиосигнала в пыльной буре

Аналогично для пыльной бури высотой 5,5 км в городе Кадасия рассчитаем связь между общим затуханием и эталонной видимостью для различных частот при $h_1 = 5,5$ км, $\theta = 30^\circ$, $F = 10, 14, 24,$ и 37 ГГц. Результаты расчета приведены на рис. 3.11, на примере пыльной бури высотой 5,5 км, наблюдавшейся в Центральном регионе Ирака, в городе Кадасия в октябре 2017 г.

На частотах 10, 14, 24 и 37 ГГц, общее затухание получено при опорной видимости 0,1 км и составляет 0,0033, 0,0211, 0,0431 и 0,0857 дБ соответственно.

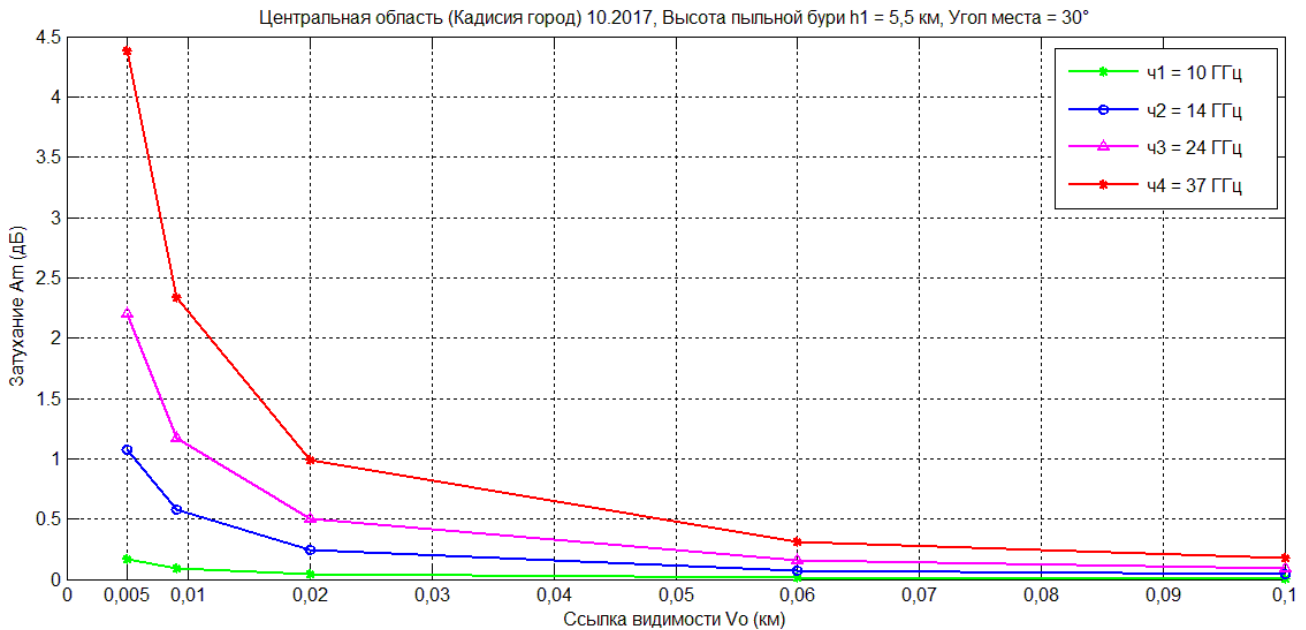


Рис. 3.11. Влияние частоты на затухание радиосигнала в пыльной буре

Анализ полученных результатов. Как следует из рис. 3.10 и рис. 3.11 увеличение частоты приводит к увеличению общего затухания. При снижении видимости менее 10 метров, что часто наблюдается при пыльных бурях, затухание резко увеличивается и на основных частотах спутниковой связи может составлять от 1 до 5 децибел. Это необходимо учитывать при проектировании линий спутниковой связи для регионов с жарким климатом.

Математическая модель затухания по линии Земля-спутник позволяет определять ослабление сигналов станций космического базирования, работающих в различных частотных диапазонах спутниковой связи: X, Ku, K, и Ka.

На частотах 10, 14, 24 и 37 ГГц, общее затухание получено при опорной видимости 0,005 км и составляет 0,169, 1,077, 2,2 и 4,376 дБ соответственно. По мере улучшения видимости расхождение между четырьмя значениями ослабления становятся меньше. Но по мере ухудшения видимости затухание растет экспоненциально и может составлять значительную величину, что требует коррекции методика расчета линий связи спутник-Земля для регионов с частыми пыльными бурями.

§ 3.5. Математическая модель передаточной функции радиоканалов спутниковой радиосвязи

Передаточные функции радиоканалов спутниковой радиосвязи значительно различаются по своим свойствам. Например, у низкоорбитальной спутниковой системы Гонец-Д1М, с космическими аппаратами (КА), находящимися на почти круговых полярных орбитах высотой 1400-1500 км, характеристики каналов связи с наземными абонентами существенно отличаются от характеристик радиоканалов этих спутников с КА, находящимися на геостационарных орбитах. При радиосвязи с наземными абонентами радиосигналы низкоорбитальных КА, летающих по орбитам высотой до 2000 км, проходят через атмосферу, затухая в ее газах, переотражаясь от слоев атмосферы с разной температурой и рассеиваясь на турбулентностях атмосферы и гидрометеорах различного вида (дождь, снег, туман).

Оказывает влияние на радиосигналы и ионосфера. Под влиянием солнечной и геомагнитной активности происходит возбуждение ионосферы и большое число неоднородных образований различного размера, находятся в постоянном движении, рассасываясь и возникая вновь, что вызывает рассеяние и хаотичные повороты плоскости поляризации радиоволн. По этим причинам на антенну в точке приёма кроме основного сигнала, приходит множество рассеянных волн, интерференция которых вызывает замирания — случайные изменения амплитуды и фазы сигнала [68].

Передаточная функция спутникового радиоканала. Когда сигнал проходит по радиоканалу, амплитуда и фаза радиосигнала умножаются на изменяющийся во времени комплексный коэффициент, который называется передаточной функцией радиоканала. Некоторые параметры радиоканала не случайны, а некоторые изменяются по случайным законам. Поэтому математическая модель передаточной функции спутникового радиоканала может быть представлена суммой детерминированной и случайной составляющих [99]. Рассмотрим эти составляющие поочередно.

Детерминированная составляющая передаточной функции радиоканала спутник-Земля. Детерминированные компоненты передаточной функции СРК включают в себя затухание сигнала при его распространении в свободном пространстве, потери в газах атмосферы. Доплеровские сдвиги частоты в радиоканалах с быстро движущимися низкоорбитальными спутниками тоже не случайны. Затухание из-за присутствия гидрометеоров, затухание во время пыльных и песчаных бурь представляют собой редкие и не регулярные случайные процессы. Однако экспериментальные исследования этих процессов выявили закономерности их влияния на радиосигналы, позволяющие описать их детерминированными выражениями [15, 18, 41, 71, 73], зависящими от параметров этих процессов. Аналитические выражения, описывающие ослабление этих сигналов в спутниковой связи (СС), приведены в ряде работ [5, 88, 99-101], а общее ослабление сигналов СС можно описать выражением:

$$B = b_{fs} + b_{atm} + b_{rain} + b_{d,s}, \quad [\text{дБ}], \quad (3.41)$$

где: $b_{fs} = 92,45 + 20\lg(R) + 20\lg(f)$ – затухание в свободном пространстве; R – расстояние от спутника до земной станции, км; f – радиочастота, ГГц. b_{atm} – потери в атмосферных газах; b_{rain} – затухание изза дождей и других гидрометеоров; $b_{d,s}$ – затухание в пылевых и песчаных бурях.

Влияние газов атмосферы на ослабление радиосигналов различных частот приведено на рис. 1.3 и рис. 1.14. Однако следует отметить, что ослабление радиоволн атмосферными газами нелинейно зависит от угла места, как показано на рисунке 3.12, так как при этом изменяется длина пути сигнала через атмосферу. При малых углах места, что характерно для севера России, этот путь от 18-20 километров для угла места 90° увеличивается до 80-90 километров и затухание соответственно растет. На рисунке 3.12 показан рост пути радиолинии через атмосферу с уменьшением угла места наземных антенн.

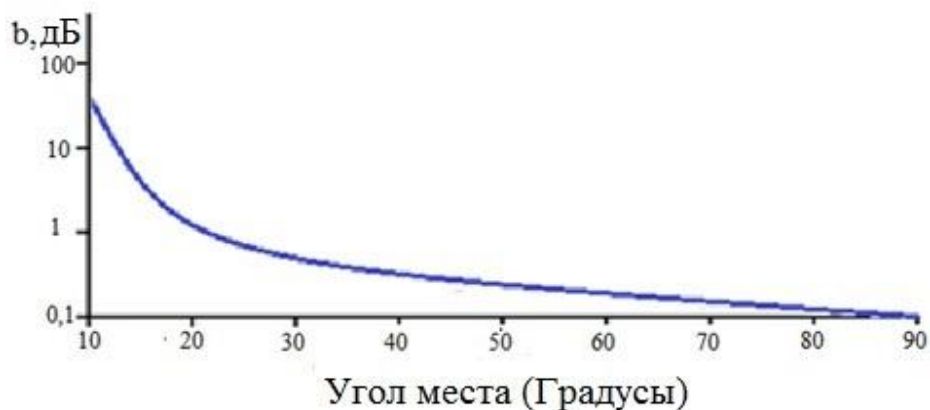


Рис. 3.12 – Изменение поглощения сигнала атмосферными газами от угла места антенны (Зависимость приведена для частоты 28,5 ГГц).

Частотная зависимость коэффициента поглощения радиоволн в атмосфере экспериментально получена и теоретически исследована в ряде работ и отражена в рекомендациях Международного союза электросвязи [67, 71,73]. На основании этих экспериментов определяется зависимость затухания радиоволн при распространении в атмосфере Земли, которая показана на рисунке 1.14. Анализ экспериментальных данных показывает, что минимальное поглощение волн наблюдается в так называемых «окнах прозрачности атмосферы» на длинах радиоволн 1,2 мм, 2 мм, 3 мм.

Потеря энергии сигнала, вызванная осадками, включая дождь, мокрый снег и облака, проявляется на частотах выше 20 ГГц. На некоторых частотах (см. рис.1.14) это самый сильный механизм ухудшения качества полезного сигнала на спутниковых линиях связи Земля-космос и космос-Земля.

Экспериментальные исследования влияния гидрометеоров на радиоволны проводились многими исследователями в различных климатических зонах при различных условиях, включая проливные ливни. Поглощение энергии сигнала, распространяющегося в дождях и других гидрометеорах, зависит от интенсивности осадков. На основании многочисленных экспериментов, результаты которых приведены в [12, 67, 73, 102], можно аналитически описать

влияние осадков на распространение сигнала. В работе [106] показано, что коэффициент поглощения радиосигнала линейно возрастает с увеличением интенсивности дождя, а поглощение в гидрометеорах в зависимости от частоты можно аппроксимировать выражением (2.5). Затухание радиоволн в свободном пространстве описывается выражением (2.3), а потери энергии радиоволн в пылевых бурях выражением (3.14).

Подставляя в (3.41) выражения (2.3), (2.5), (2.14) и (3.40) получим

$$B = [92,45 + 20 \lg(R) + 20 \lg(f)]_{fs} + \left(\frac{f}{70}\right)^2 Y + b_{atm} + \left[0,578 \times \times 10^{-3} \frac{F h_1^{0,72}}{V_0^{\gamma} \sin \theta} \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2}\right)\right]_{d,s}$$

где величина b_{atm} определяется по зависимости, показанной на рис. 1.14.

Случайная составляющая передаточной функции спутниковых радиоканалов. Непрерывное изменение свойств тропосферы и ионосферы оказывает сильное влияние на качество спутниковой связи. Разница в показателях преломления в разных слоях атмосферы и рассеяние на ее турбулентностях приводят к многолучевости в радиоканалах и как следствие к быстрым замираниям. Мерцание ионосферы, задержка распространения радиоволн, вращение плоскости поляризации и другие эффекты, вызванные флуктуациями свободных зарядов в ионосфере, воздействуют на радиосигналы на частотах ниже 10 ГГц также аналогично замираниям сигнала [100].

В течение длительного времени свойства спутникового радиоканала (СРК) на частоте f_0 могут быть описаны сложным нестационарным случайным процессом $H(t, f_0)$. Описание нестационарных случайных процессов затруднено, но на интервалах времени от 2 до 5 минут, совпадающих с интервалом длительности замираний, радиоканал можно считать локально стационарным. Это позволяет описать свойства ее передаточной функции плотностью распределения вероятностей и корреляционными функциями замираний.

Опыт исследования и эксплуатации микроволновых систем радиосвязи показал, что на практике замирание сигналов, вызванных многолучевым распространением, происходит по закону Рэлея не более чем в 60% времени сеансов связи [88, 90, 91]. В остальное время соблюдаются другие законы распределения случайных замираний. Поэтому для моделирования СРК удобнее выбрать четырехпараметрический закон распределения замираний, который позволяет заменой его параметров получать рэлеевское, бимодальное, усеченно-нормальное и другие распределения замираний, встречающиеся на практике [102].

Математическое описание передаточной функции СРК может быть записано в сложной форме в виде суммы квадратурных компонентов

$$\dot{H}(f, t, \{C\}) = He^{j\varphi} = X + jY = \sum_{i=1}^M H_i \cos \varphi_i + i \sum_{i=1}^M H_i \sin \varphi_i \quad (3.43)$$

где: H_i – модули и аргументы передаточной функции i -го отражателя сигнала, распределенные по случайным законам $W_i(H)$, $W_i(\varphi)$; H – модуль передаточной функции радиоканала; $(f, t, \{C\})$ – аргумент передаточной функции; $\{C\}$ – множество специфических условий на пути связи; M – количество отражателей радиосигнала.

Передаточная функция СРК зависит от многих факторов и, в силу центральной предельной теоремы, для $M \rightarrow \infty$, X и Y будут распределяться нормально, независимо от законов распределения H_i . Найдя характеристические функции величин X и Y , затем амплитуды передаточной функции радиоканала H и выполнив обратное преобразование Фурье, получим четырехпараметрическое дифференциальное распределение передаточной функции радиоканала [102]. Распределение было названо четырехпараметрическим, поскольку оно зависит от четырех параметров m_x , m_y , σ_x , σ_y :

$$w(H) = 2HN_xN_y \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{K_x^i K_y^j H^{2(i+j)}}{i! j! (i+j)!} \right] {}_1F_1 \left[(i+0,5); (i+j+1); \left(\frac{1}{2\sigma_x^2} - \frac{1}{2\sigma_y^2}\right) H^2 \right], \quad (3.44)$$

где: ${}_1F_1[\alpha; \beta; \gamma]$ – вырожденная гипергеометрическая функция;

$K_y, N_y, m_x, m_y, \sigma_x, \sigma_y, K_x, N_x$ – параметры распределения;

$$k_x = \frac{m_x^2}{4\sigma_x^4}; N_x = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2}\right);$$

$$K_y = \frac{m_y^2}{4\sigma_y^4}; N_y = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right).$$

Плотность распределения вероятностей фазы передаточной функции также распределена по четырехпараметрическому закону.

$$w(\varphi) = \frac{\sigma_x\sigma_y \exp\left(-\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right)}{2\pi(\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)} \cdot (1 + L\sqrt{\pi} \exp L^2) \cdot (1 + \Phi(\sqrt{2}L)), \quad (3.45)$$

где: $\Phi(\bullet)$ – интеграл вероятностей Гаусса; $L = \frac{m_x\sigma_y^2 \cos \varphi + m_y\sigma_x^2 \sin \varphi}{\sigma_x\sigma_y \sqrt{\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi}}$.

Такая модель затухания соответствует теории рассеяния радиоволн на однородностях и является универсальной, поскольку при разных значениях параметров она приводит [12] к различным законам распределения замираний, встречающихся на линиях связи. Изменяя параметры четырехпараметрического закона распределения вероятностей, нетрудно прийти к тем законам распределения вероятностей флуктуаций амплитуды и фазы, которые наблюдаются в сигналах, проходящих через реальный СРК [76].

Выводы по главе 3.

1. Определены потери сигнала при распространении в свободном пространстве для разных частотных диапазонов при различных орбитах КА.
2. Определены зависимости затухания сигналов на линиях спутниковой связи КА – земная станция, возникающего в атмосферных газах, из-за угла места приемных антенн, наличия гидрометеоров и многолучевости.
3. Предложено интерференционные замирания описывать четырехпараметрическим законом распределения вероятностей, наиболее корректно описывающим замирания сигналов, возникающие из-за многолучевости.
4. Выведены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать затухание радиосигналов различных частотных диапазонов в пыльных и песчаных бурях.
5. Предложена математическая модель передаточной функции радиоканалов на линиях спутниковой связи с Землей, объединяющая возможные потери при передаче информации на таких линиях связи.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В КАНАЛАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ИЗ-ЗА ПЫЛЬНЫХ БУРЬ

§ 4.1. Влияние высоты на видимость во время песчаных и пыльных бурь

Изменение массовой концентрации пыли с высотой. Расчеты потерь почвы из районов, подверженных ветровой эрозии связаны с информацией об изменении массовой концентрации пыли с высотой над землей. В литературе мало информации такого рода. Хотя первые данные исследований 1954 года не включают больших высот, с помощью телескопического подъема оборудования они дают некоторую возможность оценивать концентрацию массы пыли выше высот измерений, как показано на рис. 4.1 [39].



Рисунок 4.1. Атмосферное пылеулавливающее оборудование, используемое в полевых условиях. Измерения проводились при видимости в 0,55 мили вблизи города Менно, штат Канзас, США, 23 марта 1955 года [39].

Зависимость между высотой и концентрацией массы пыли представляют собой степенное уравнение общего вида. Изменение измеренной концен-

трации массы пыли с высотой над поверхностью земли может быть описано эмпирическим уравнением

$$M = \frac{a}{h^b} \quad (4.1)$$

где: M - концентрация массы пыли ($\text{кг}/\text{м}^3$), h - высота (м), a - константа, определяющая соотношение концентрации и высоты, b - константа, определяющая наклон зависимости концентрации от высоты.

Установлено, что среднее значение констант a и b составляет 12,4 и 0,28 соответственно [39]. Эти константы зависят от распределения частиц пыли по размерам, климатических условий и некоторых метеорологических факторов. Поэтому можно сказать, что в Ираке они изменяются очень незначительно от года к году [34].

Видимость и ее соотношение с концентрацией пыли. Отношение концентрации пыли M ($\text{кг}/\text{м}^3$) к времени оседанию частиц (σ_p) является постоянной величиной K , как показано в уравнении

$$\frac{M}{\sigma_p} = K \quad (4.2)$$

Приравнивая (σ_p) к полному пропаданию частиц (σ), мы получаем уравнение

$$\sigma_p = \sigma \quad (4.3)$$

Тогда уравнение 4.2 можно записать в виде:

$$\sigma = \frac{M}{K} \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) справедливо для условий малой видимости, и подставляя это соотношение в соотношение Кошмидера [97] для видимости V получим

$$V = \frac{3,912}{\sigma} \quad (4.5)$$

Отсюда, с учетом (4.4), соотношение

$$V = \frac{3,912 K}{M} \quad (4.6)$$

Обозначим $C = 3,912 K$, тогда уравнение (4.6) станет

$$V = \frac{C}{M} \longleftrightarrow M = \frac{C}{V} \quad (4.7)$$

где: M - концентрация пыли (или масса пыли на кубический метр воздуха [47], ($\text{кг}/\text{м}^3$), или масса взвешенных частиц пыли на единицу объема воздуха [34]), V - видимость (км).

Различные относительные распределения частиц по размерам приведут к различным значениям для K и, следовательно, для C . Если распределение частиц по размерам изменяется согласованным образом с увеличением или уменьшением видимости, эмпирическое соответствие данным, связывающим концентрацию и видимость как функциональную зависимость, полученную методом наименьших квадратов, может привести к уравнению [97].

$$M = \frac{C}{V^\gamma} \quad (4.8)$$

где: C - размерная постоянная ($\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{км}$), γ - безразмерная постоянная, характеризующий зависимость видимости от размера частиц пыли или песка [96].

Зависимость (4.8) дает возможность рассчитать массу взвешенных пылевых частиц на единицу объема воздуха, то есть концентрацию пыли от видимости во время пылевых бурь на высоте (h).

Видимость уменьшается с увеличением интенсивности пыльной бури [47]. Значения C и γ зависят от происхождения пыльной бури и климатических условий [34]. При соотношении видимости во время пылевых бурь ($V < 1$ км) и концентрации массы пыли обычно применяются измеренные значения C в зависимости от ряда факторов, таких как:

1. Наличие или отсутствие локальной эрозии.
2. Расстояние от источника аэрозоля.

Крупночастичная мода быстро уменьшалась с высотой, поэтому мы считаем, что только мелкочастичная мода будет иметь значение на некотором расстоянии от источника аэрозоля [97].

В Ираке пылевые явления возникают локально во многих регионах, особенно в Джазире и в Западных пустынных районах, как показано на рис. 2.8. Кроме того, пылевые бури приходят из-за пределов Ирака, таких как пустыня Синайского полуострова в Арабской Республики Египет, которая находится в 1007 км от Ирака, из Аравийского полуострова и Великой пустыни на севере Африки, находящиеся в 2067 км [37] от Ирака.

3. Тип почвы, из которой возникла пыльная буря [106, 47]. Тип почвы в Ираке это пыльная, глинистая и илистая природа [37]. В таблице 4.1 показаны примеры пыльных явлений.

Таблица 4.1: Классификация пыльных явления происходящих в Ираке

Переменная	Взвешенная пыль	Поднимающаяся пыль	Песчаная буря	Пыльная буря
Продолжительность	Много дней [40], 1-15 часов [40,42]	-----	-----	-----
Радиус Р (мкм)	100 мкм и глинистые частицы 2 мкм [25]	1 and 500 [25]	$P_{\text{Средний}} \leq 125$ [42] $P > 40$ [34]	Мелкая частица $P \leq 0.025$ мкм Крупная частица $P \leq 50$ мкм [40] $P > 250$ мкм [25] $5 \leq P \leq 40$ мкм [34]
Расстояние	Активные ветры могут перенести пыль на большие расстояния	Активные ветры далеко переносят пыль	Единицы, реже десятки километров	От десятков до тысяч километров (даже между континентами)

4. Размер частиц пыли. В работе [97] обсуждался размер пылевых частиц для четырех случаев:

- Общее распределение массы пыли. К ним относятся все размеры частиц (большие и малые размеры).
- Режим малых частиц (МЧ), где радиус частиц $r < 10$ мкм.
- Сопоставимые значения для режима малых частиц ($r < 10$ мкм) и размеров, где радиус частиц $r < 20$ мкм: как показано в таблице 4.1.

Эти три результата показывают, что в условиях локальной эрозии радиус частиц, центрированный между 20 и 100 мкм ($20 < r < 100$ мкм), имеет

важное значение для определения констант, связывающих видимость с концентрацией пыли. Этот режим очень изменчив и сильно зависит от почвенных условий, причем концентрация пыли быстро уменьшается с высотой. Отсюда следует, что в условиях локальной эрозии в регионах-источниках значения этих констант, вероятно, сильно изменяются. Это подтверждается результатами Чепиля и Вудраффа, полученными в 1957 году [97].

Воздушная пыль снижает видимость и приводит к изменчивости значений C . Теоретические значения C используются для расчета соотношений массы пыли и видимости, если известно дробное распределение частиц пыли по размерам. В Ираке в соответствии с [37] размер частиц пылевой бури классифицируется следующим образом:

- Мелкие частицы $0,025 \text{ мкм} > p < 50 \text{ мкм}$
- Крупная частица $p > 50 \text{ мкм}$.

5. Важные факторы это климатические условия [47] и скорость ветра.

Широкий разброс значений C , отличающихся более чем на порядок, указывает на отсутствие единого значения C , которое применимо к массовой концентрации почвенных аэрозолей и видимости.

В литературе сообщалось о различных значениях C , и согласие между различными измерениями констант, относящихся к массовой концентрации и видимости, было рассчитано по сравнению с другими измеренными значениями для городских и сельских районов, как показано в таблице 4.2 [97].

Согласно проведенным исследованиям и экспериментам, проведенным автором работы получено, что $C=2,3 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{км} \right)$ и $\gamma=1,07$ применимы к условиям иракской ситуации и к пыльным бурям, связанным с Азией. Будем использовать это в настоящей работе.

В таблице 4.2. показаны результаты экспериментальных исследований, полученных разными исследователями в разные годы и даже на разных континентах.

Таблица 4.2. Сравнение констант, полученных разными исследователями

Сравнение констант, характеризующих пыль, полученных разными исследователями.		$C \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \cdot \text{км} \right)$	γ
Национальный центр атмосферных исследований (1977 г), [97]	Общая массовая концентрация пыли	0,023	1,07
	Мелкая частица (МЧ) $p < 20$ мкм	0,017	1,08
	(МЧ) $p < 10$ мкм	0,013	0,95
Бертран, [108] Несколько тысяч километров от источника пыли.	-----	-----	1,05
Чепил и Вудрафф (1977 г), [39]	Общая массовая концентрация пыли (Локальная пылевая эрозия) (Более крупные частицы пыли)	-----	1,25
	Отсутствие локальной эрозии	0,02	-----
	-----	0,05 (1954 г)	-----
	-----	0,093 \approx 1 (1955 г)	-----
Чарльсон (1969 г), [109]	Городские районы	-----	1
[39, 97]	-----	0,02 $\leq C \leq$ 0,1 В зависимости от состояния почвы, видимости и скорости ветра.	-----
	Отсутствие локальной эрозии	0,02	-----

Уравнение (4.8) между видимостью и концентрацией пыли было использовано для определения концентрации массы пыли в атмосфере [39]. Функциональные зависимости между измеренной концентрацией массы пыли на высоте 6 футов ($h_0=1,8 \text{ м} = 0,0018 \text{ км}$) (нижняя абсцисса) и видимостью показаны на рис. 4.2 [39].

Однако концентрация должна быть выражена в терминах количества вещества в данном объеме атмосферы. Верхняя абсцисса на рис. 4.2 преобразует среднюю линию в единицы общей пылевой нагрузки в тоннах на кубическую милю. Сделано это преобразование на основе измеренной концентрации

на 6-футовом высоте ($h_0 = 1,8 \text{ м}$) и средней пропорциональности концентрации

к высоте, т. е. $M \propto \frac{1}{h^{0.28}}$

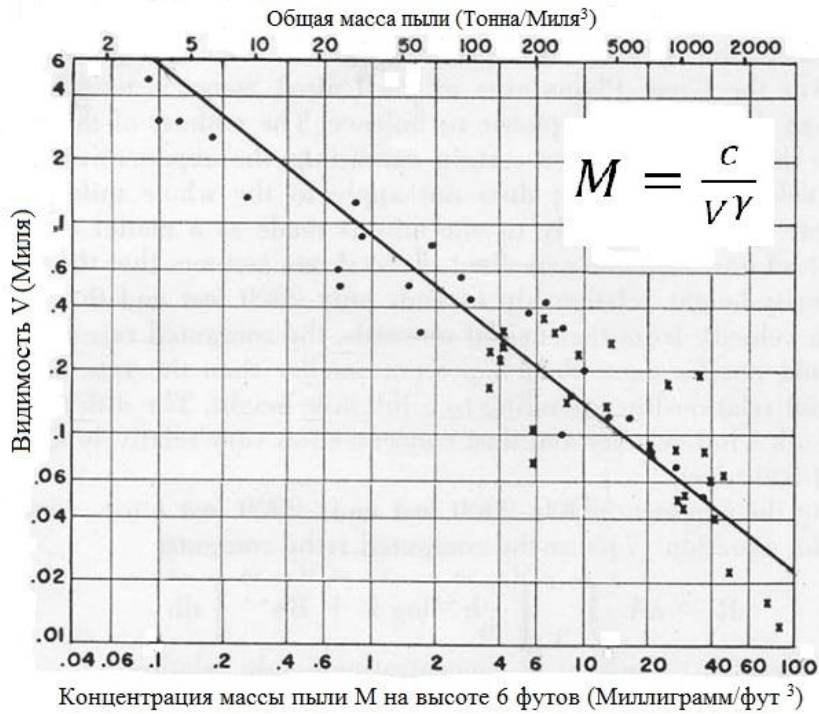


Рисунок 4.2. Связь между видимостью и концентрацией массы пыли на высоте 6 футов ($h_0 = 1,8 \text{ м} = 0,0018 \text{ км}$) [39].

На рисунке 4.3 показана связь между видимостью и концентрацией массы пыли при двух явлениях - подъеме пыли и пылевой буре в Ираке на высоте $h_0 = 1,5 \text{ м}$.

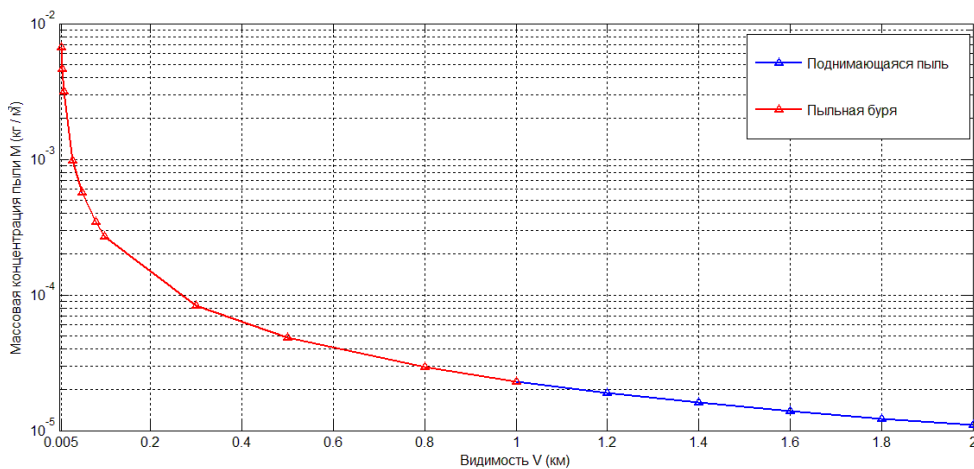


Рис. 4.3. Связь между видимостью и концентрацией массы пыли

Анализ полученных результатов.

- Увеличению концентрации пыли приводит к уменьшению видимости.
- Дальность видимости при поднимающейся пыли от 1 до 2 км, а при пылевой буре менее 1 км, что на рис. 4.3 отображено синим и красным цветом соответственно.

Относительный объем пыли (плотность пыли) и видимость. Плотность пыли зависит от количества взвешенных частиц пыли в единице объема воздуха и является существенным фактором, необходимым для вычисления констант (параметров) распространения пылевой среды. Однако плотность или относительный объем это параметр, который трудно получить или измерить во время бури, поскольку относительный объем пыли, рассеянной в воздухе во время пылевых бурь, намного меньше единицы ($\ll 1$) даже для очень низких видимостей. Поэтому на практике относительный объем пыли не используется для измерения тяжести пылевых бурь. Вместо этого используется критерий видимости во время пыльной бури.

Видимость используется для наблюдения климатических условий, пылевых и песчаных бурь, других метеорологических факторов и распределения частиц пыли по размерам. Пыльные бури метеорологически наблюдаются с использованием видимости [34, 107]. Видимость также обычно требуется для вычисления констант распространения пыльных сред.

Авторы работы [106] обнаружили связь между относительным объемом пыли и видимостью. Это соотношение обусловило возможность расчета затухания электромагнитных волн во время пылевых бурь по критерию видимости. В пылевых бурях относительный объем частиц ν , связан с видимостью V . Относительный объем частиц ν , представляет собой отношение плотности дисперсной пыли ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) или концентрации массы пыли M к плотности твердой пыли, ρ_0 ($\text{кг}/\text{м}^3$), как показано в соотношении

$$\nu = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{M}{\rho_0} \quad (4.9)$$

Если подставить уравнение (4.8) в уравнение (4.9), то получим

$$V = \frac{C}{V^\gamma \rho_0} \quad (4.10)$$

В результате исследований и экспериментов, выполненных в Ираке в 2021 году автором настоящей работы, было определено, что значения $C = 2,3 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{км}\right)$, $\gamma = 1,07$ и $\rho_0 = 2440 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ применимы к ситуации Ирака для получения соотношения между относительным объемом пылевых частиц V и видимостью V , как показано в уравнении:

$$V = \frac{9,42 \times 10^{-9}}{V^{1,07}} \quad (4.11)$$

Это уравнение обеспечивает простоту применения к целому ряду характеристик пылевых бурь. Видимость напрямую связана с тем, насколько сильна пыльная буря, и как она представляет собой меру серьезности пыльной бури. Можно применить видимость для обозначения степени плотности и концентрации пылевой бури вместо общего количества пылевых частиц на кубический метр воздуха или относительного объема. Это соотношение обычно применяется при разработке моделей распространения пылевых бурь, поскольку оно обеспечивает удобный способ применения к сценариям других пылевых бурь. Оно также позволяет использовать метод оценки концентрации пыли по информации о видимости, измеренной во время пыльной бури [34].

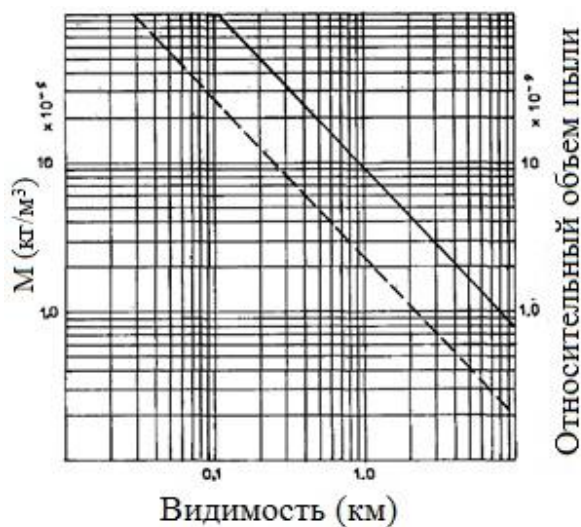


Рис. 4.4. Концентрация пыли и относительный объем пыли в зависимости от видимости [47].

Рисунок 4.4. дает представление приведенного выше уравнения (4.11). Стоит отметить, что плотность пыли, используемая при выводе уравнения (4.11) составляет 2,44 г/см³. Это значение представляет собой среднюю измеренную плотность девяти образцов, собранных в Хартуме, в Судане [36].

Характеристика пылевой бури с использованием видимости более реалистична, чем использование концентрации пылевых частиц на единицу объема (или относительного объема v), которое трудно измерить [106].

Влияние высоты на видимость во время песчаных и пыльных бурь в Ираке. Существенной разницей между воздействием пылевых бурь на наземные и наземно-спутниковые линии связи является изменение видимости с высотой. Изучение влияния пылевых бурь на работу спутниковых линий связи Земли требует знания изменения видимости с высотой. Влияние высоты на видимость является одним из существенных факторов, которые обычно учитываются при вычислении параметров распространения в пыльной среде.

Изменение концентрации пыли с высотой приведено в уравнении (4.1). Аналогично, концентрация пыли связана с видимостью во время пыльных бурь, как показано в уравнении (4.8). Приравнивание (4.1) и (4.8) даст выражение

$$\frac{c}{v^Y} = \frac{a}{h^b} \quad (4.12)$$

Переставьте уравнение:

$$\frac{c}{a} = \frac{v^Y}{h^b}$$

Можно переписать уравнение (4.12), если V_0 - видимость на некоторой опорной высоте h_0 .

$$\frac{c}{a} = \frac{v_0^Y}{h_0^b} \quad (4.13)$$

Уравнение (4.12) можно подставить в (4.13) и получим новое выражение

$$\frac{v^Y}{h^b} = \frac{v_0^Y}{h_0^b} \quad (4.14)$$

Переписывание данных в терминах видимости дает выражение

$$V^\gamma = V_0^\gamma \left[\frac{h}{h_0} \right]^b \quad (4.15)$$

Переставим в уравнении (4.15) гамму получим

$$V = V_0 \left[\frac{h}{h_0} \right]^{\frac{b}{\gamma}} \quad (4.16)$$

где: $b=0,28$ и $\gamma=1,07$ являются константами, как уже упоминалось ранее,

Подставляя эти значения в уравнение (4.16) получим:

$$V = V_0 \left[\frac{h}{h_0} \right]^{0,26} \quad (4.17)$$

где: V - видимость (км) на любой высоте h (км), связанная с эталонной видимостью V_0 (км) на эталонной высоте h_0 (км).

В соответствии с инструкцией по установке иракских метеорологических станций [110] эталонную видимость измеряют на высоте $h_0 = 1,5 \text{ м} = 0,0015 \text{ км}$. Таким образом уравнение (4.17) с использованием выделенных значений преобразуется к виду, пригодному для получения изменения видимости с высотой как:

$$V = 5,422 V_0 h^{0,26} \quad (4.18)$$

где: V , V_0 и h - все в км.

На рисунке 4.5 показано соотношение между видимостью и опорной видимостью для разных высот $h = 0,05, 0,3$ и 4 км в Ираке.

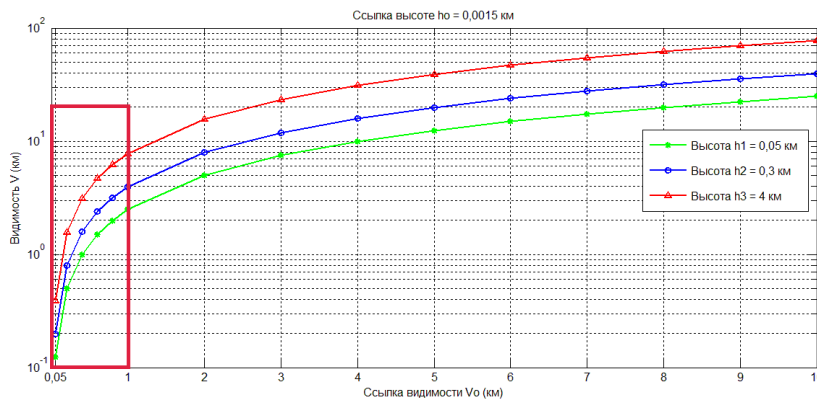


Рис. 4.5. Изменение видимости с высотой для различной видимости на опорной высоте

Из зависимостей, приведенных на рис. 4.5 следует, что:

- На высотах более одного километра видимость достигает нескольких километров и мало зависит от высоты.
- Видимость вдоль пути распространения радиосигнала не является постоянной, потому что с увеличением высоты ($h = 0.05, 0.3, \text{ and } 4 \text{ km}$) видимость также увеличивается.
- Примечательно, что видимость быстро уменьшается из-за пыльных бурь (красная область), когда видимость на опорной высоте составляет менее 1 км ($V_o < 1 \text{ км}$) и плавно уменьшается, когда видимость на опорной высоте превышает 1 км ($V_o > 1 \text{ км}$).

§ 4.2. Влияние угла места на затухание радиосигнала из-за песчаных и пыльных бурь

Реальные данные о видимости во время пыльных бурь и высоте пыльных бурь получены от Иракской метеорологической организации [110] для нескольких городов и охватили период с 2016 по 2020 год. Ниже приведена структура алгоритма, который позволяет выполнить расчеты затухания радиосигнала спутниковой связи для разных городов Ирака.

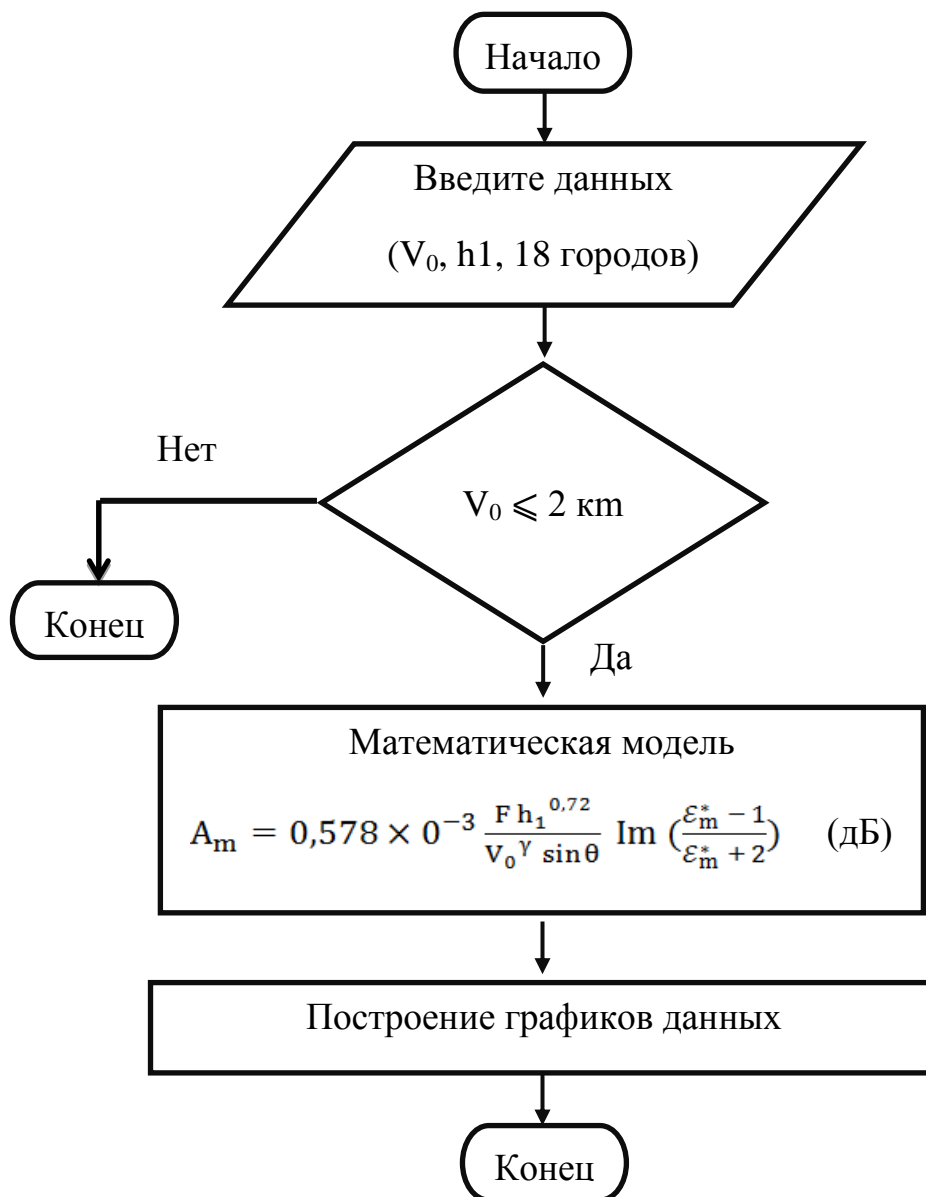


Рис. 4.6. Структура расчета затухания радиосигнала на линии спутник-Земля
из-за пыльных бурь в городах Ирака

Используя уравнение (3.40) и значения, указанные в таблице (3.1), выполним расчет величины затухания. Расчет проведем для частоты 10 ГГц при пыльной буре высотой 2 км в городе Кадисия (Ирак). На рис. (4.7) показана связь между затуханием и исходной видимостью для различных углов места наземной антенны $\theta = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, и 60° , нанесенных красным, розовым, синим и зеленым соответственно.

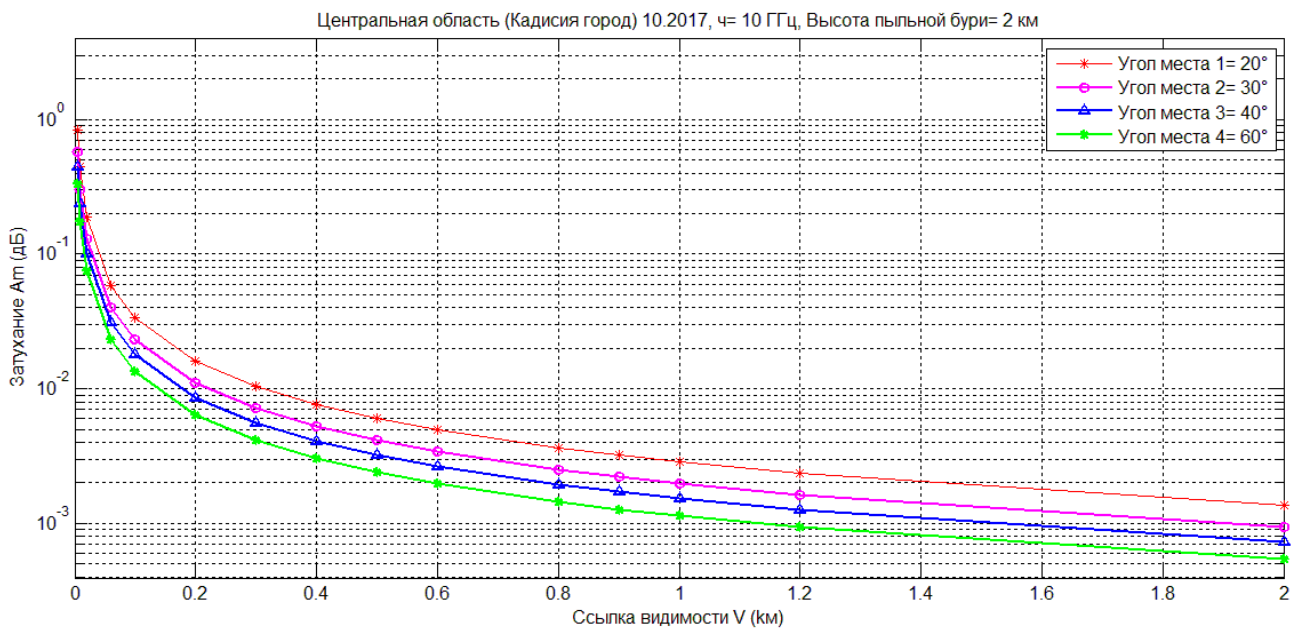


Рис. 4.7. Затухание сигнала спутника в пыльной буре при частоте $F = 10$ ГГц.

Анализ полученных результатов.

- График показывает, что меньший угол места приводит к более высокому затуханию при той же высоте пылевой бури. Причина в том, что волна проходит большее расстояние через пылевую бурю в атмосфере при меньшем угле места, но разница затухания при углах места от 20° до 60° не очень значительна в диапазоне видимости 0,005 - 2 км.

- Затухание экспоненциально уменьшается при малых видимостях, вплоть до видимости в 0,6 км, но при видимости более 0,6 км уменьшение затухания незначительно.

- При опорной видимости 0,005 км во время пыльной бури в городе Кадисия в октября 2017 года при углах места 20°, 30°, 40°, 60° расчет показал достаточно значительное ослабление радиосигналов спутника (затухание 0,835, 0,571, 0,444 и 0,33 дБ соответственно).

- Общая наблюдаемая тенденция - это увеличение ослабления по мере уменьшения угла места. Это верно, поскольку из уравнения (3.40) следует, что при приближении θ к нулю затухание приближается к бесконечности. Это является следствием того, что сигнал не распространяется непосредственно по поверхности земли.

Затухание радиосигнала зависит от рабочей частоты линии связи. Результаты расчета на частоте 37 ГГц приведены на рисунке 4.8.

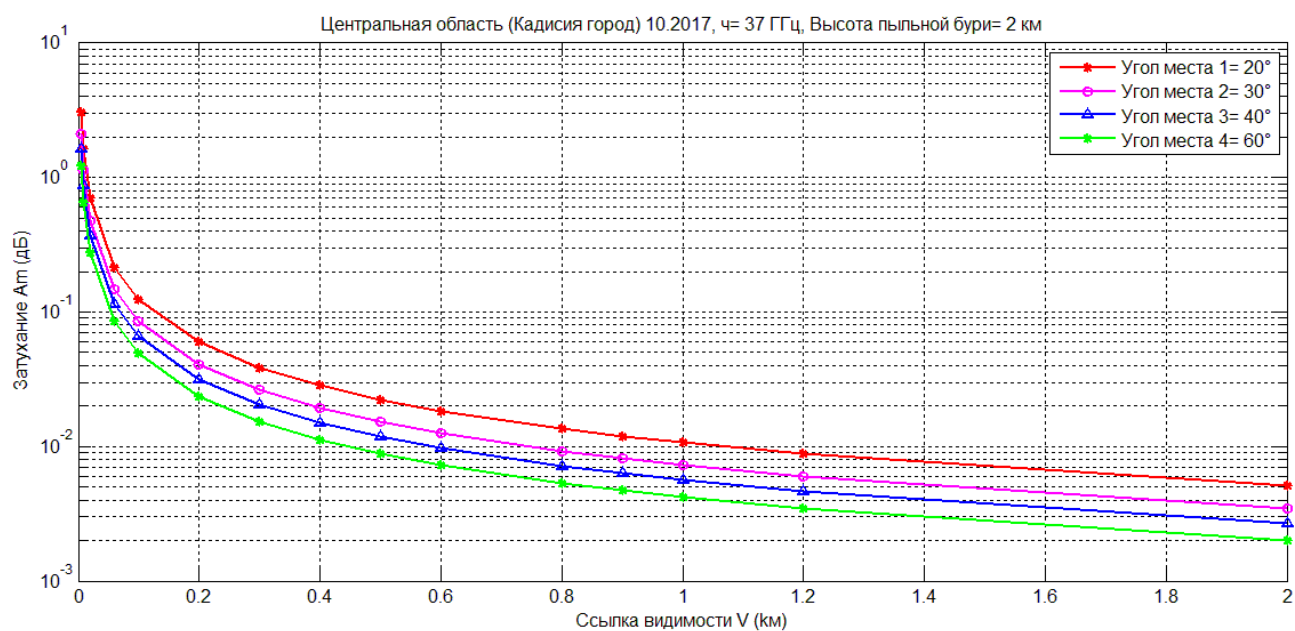


Рис. 4.8. Затухание сигнала спутника в пыльной буре при частоте $F = 37$ ГГц.

С ростом рабочей частоты спутника затухание сигнала значительно увеличивается. Это показано на рисунке 4.8, где при углах места 20°, 30°, 40° и 60° на частоте 37 ГГц затухание составляет 3,089, 2,113, 1,543 и 1,22 дБ соответственно.

Затухание в зависимости от угла места

Рассчитаем зависимость затухания от угла места наземной антенны для пыльных бурь в Ираке с часто встречающейся при этом видимостью в 100 метров. При углах места 20° , 30° , 40° , и 60° и частотах 10, 14, 24 и 37 ГГц, при опорной видимости 0,1 км и высоте пылевой бури $h_1 = 2$ км, величины затухания приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3. Затухание при различных углах места и различных частотах.

Угол места, град.	20°	30°	40°	60°
Частота, ГГц				
Затухание, дБ				
10	0,005	0,003	0,003	0,002
14	0,031	0,021	0,016	0,012
24	0,063	0,043	0,034	0,025
37	0,125	0,086	0,067	0,05

На рисунке 4.9 показана зависимость затухания от угла места для частот 10 ГГц и 14 ГГц, при опорной видимости $V_0 = 0,1$ км и высоте пылевой бури $h_1 = 2$ км.

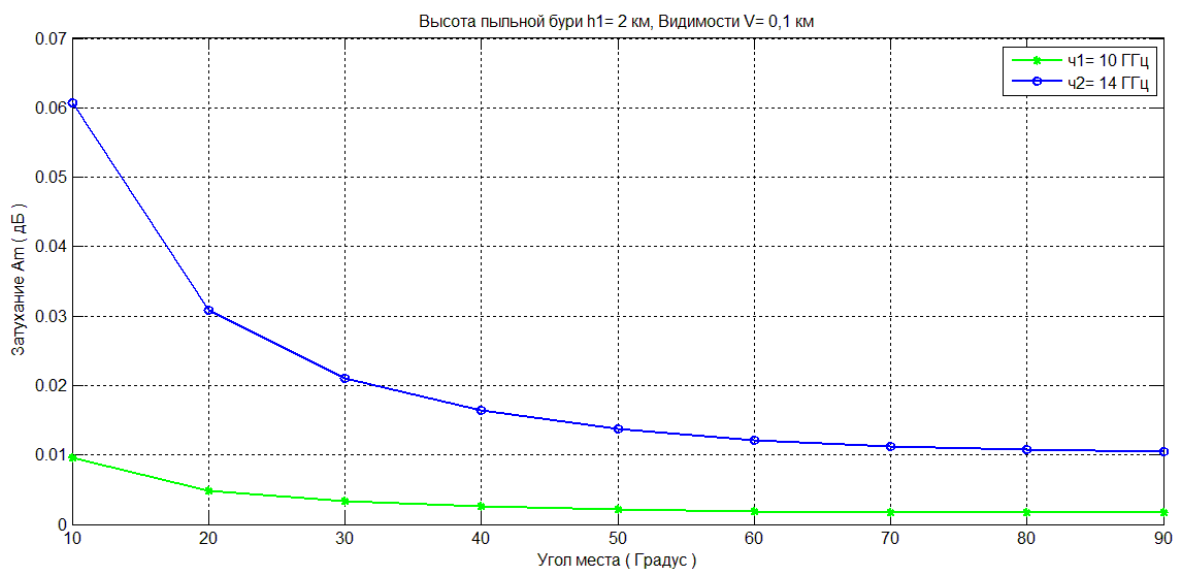


Рис. 4.9. Затухание в зависимости от угла места на частотах 10 и 14 ГГц.

На рисунке 4.10 приведена зависимость затухания от угла места для частот F 24 и 37 ГГц при опорной видимости $V_0 = 0,1$ км и высоте пылевой бури $h_1 = 2$ км.

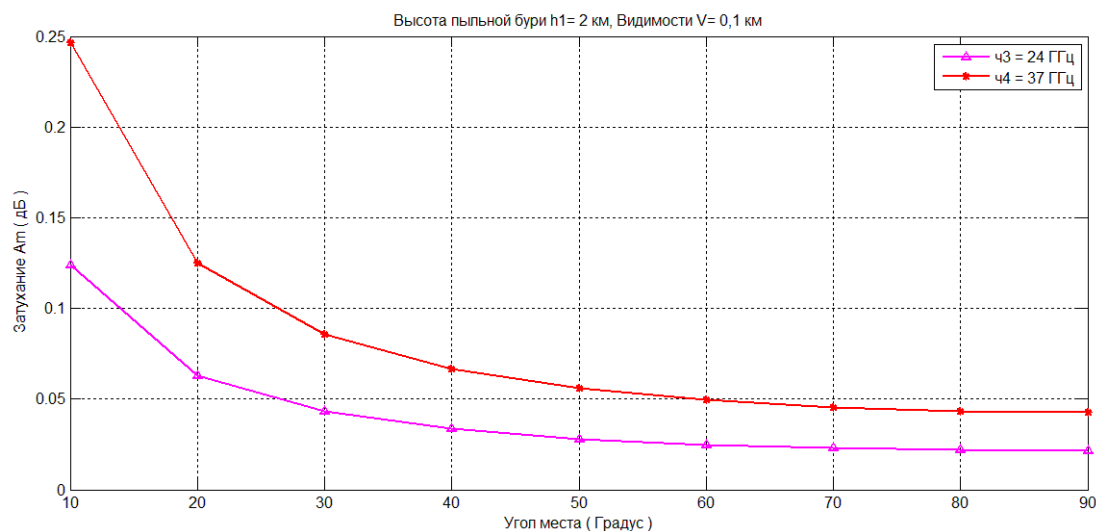


Рис. 4.10. Зависимость затухания от угла места на частотах 24 и 37 ГГц.

Графики подтверждают то, что меньший угол места приводит к более высокому затуханию. Менее 10^0 угол места при спутниковой связи наземными станциями не используется, поскольку затухание из-за неровностей земли становится слишком большим.

Разница между рисунками 4.9 и 4.10 заключается в следующем:

- На рисунке 4.9 затухание плавно уменьшается при углах места от 10° до 90° на частоте 10 ГГц, но на частоте 14 ГГц затухание быстро уменьшается с 10° до 40° и уменьшение ослабляется при углах места от 40° до 90° .

- На рисунке 4.10 заметно на обеих частотах, что затухание быстро уменьшается в интервале от 10° до 40° , а от 40° до 90° плавно уменьшается.

- Также заметно на обоих рисунках, что разница в затухании между двумя частотами велика в диапазоне от 10° до 50° , но при углах места более 50° мало заметна.

§ 4.3. Влияние высоты пыльной бури в Ираке на затухание радиоволн

Используя уравнение (3.40) и значения, указанные в таблице (3.1) выполним расчет величины затухания. На рисунке (4.11) показана связь между затуханием и исходной видимостью для различной высоты пыльной бури, $h_1 = 0,5, 1, 3$ и $5,5$ км, изображенных зеленым, синим, розовым, и красным, соответственно, при $F = 10$ ГГц и $\theta = 20^\circ$. В Ираке, в южной области, городе Ди - Кар в марте 2018 г..

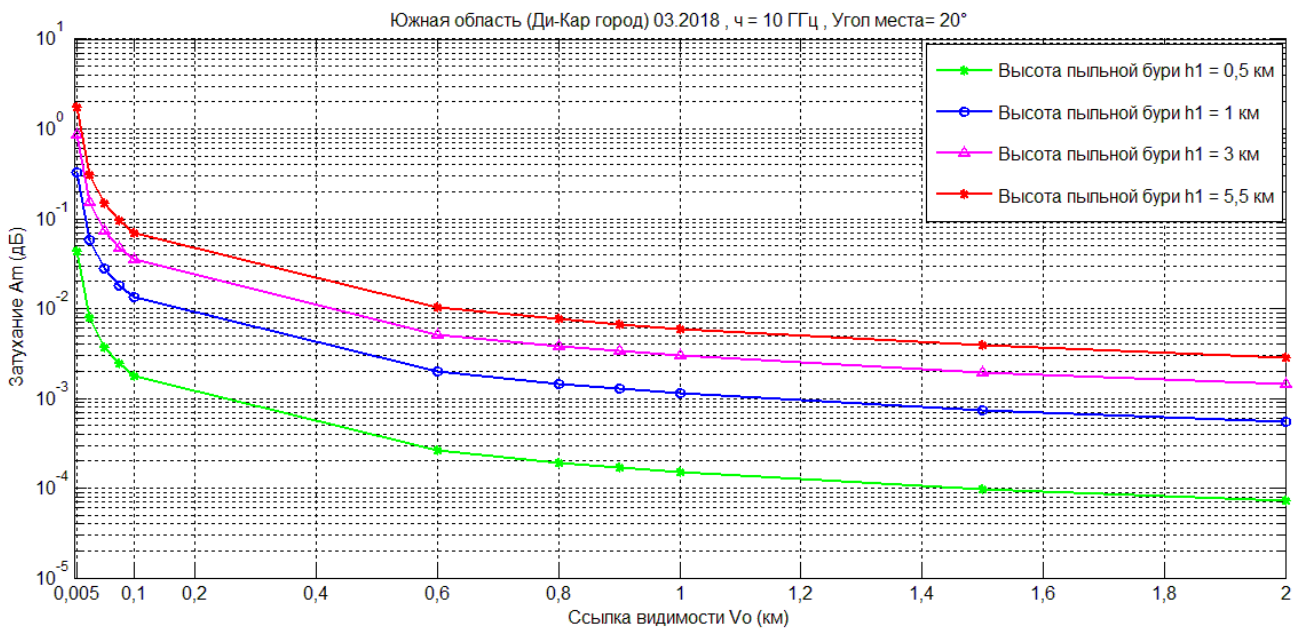


Рисунок 4.11. Влияние высоты пыльной бури на затухание на частоте 10 ГГц

Анализ полученных результатов.

- Увеличение высоты пыльной бури приводит к увеличению затухания. Как показано на рисунке, высота пыльной бури 0,5, 1, 3 и 5,5 км, затухание 0,0439, 0,3297, 0,8663 и 1,7293 дБ, соответственно, получено при эталонной видимости 0,005 км. Причина в том, что волна проходит большее расстояние при более высоких пыльных бурях.

- Кроме того, уменьшение опорной видимости приводит к увеличению затухания.

- Затухание быстро увеличивается, когда исходная видимость меньше 0,6 км, но затухание плавно уменьшается, когда исходная видимость превышает 0,6 км.

- Наконец, разница в значениях затухания примерно одинакова для четырех высот пыльной бури, когда исходная видимость превышает 0,1 км, и становится все меньше и меньше, когда исходная видимость меньше 0,1 км.

На рисунке (4.12) показано затухание 0,0615, 0,4615, 1,2128 и 2,4211 дБ при высоте пыльной бури $h_1 = 0,5, 1, 3$ и $5,5$ км соответственно, полученное при исходной видимости 0,005 км, при $F = 14$ ГГц и $\theta = 20^\circ$. В Ираке в южной области, городе Ди -Кар в марте 2018 г..

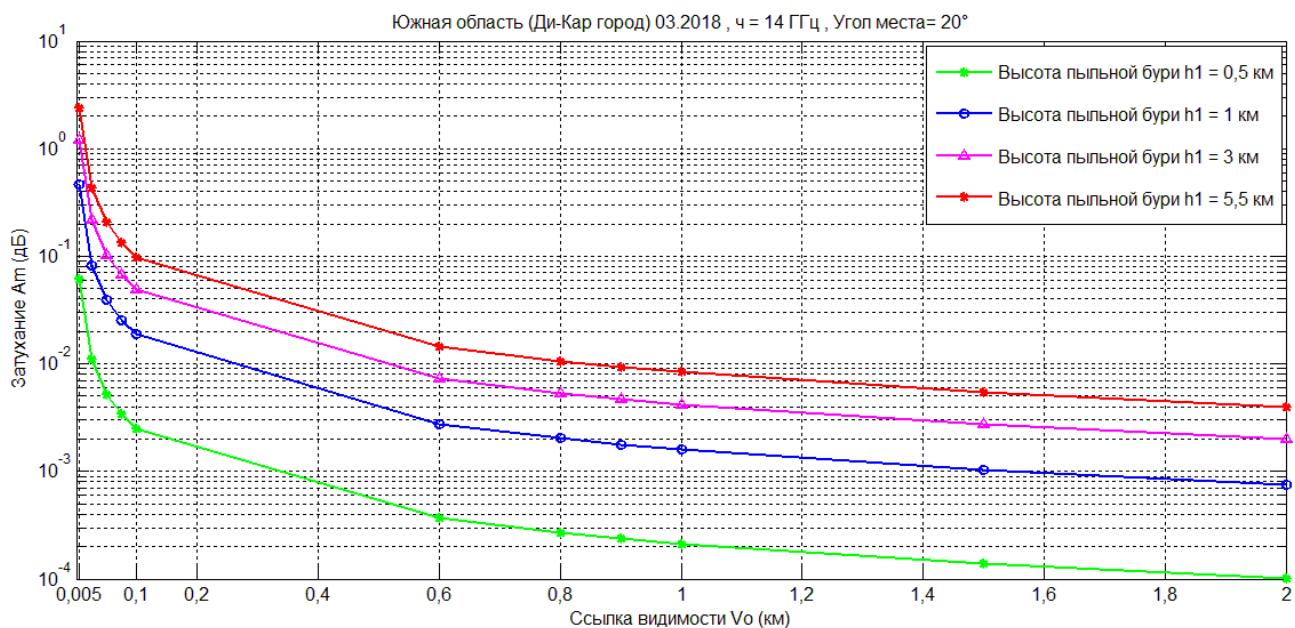


Рисунок 4.12. Влияние высоты пыльной бури на затухание на частоте 14 ГГц

На рисунке (4.13) показано затухание 0,1055, 0,7912, 2,0791 и 4,1504 дБ при высоте пыльной бури $h_1 = 0,5, 1, 3$ и $5,5$ км соответственно, полученное при исходной видимости $0,005$ км, при $F = 24$ ГГц и $\theta = 20^\circ$. В Ираке, в южной области, городе Ди -Кар в марте 2018 г..

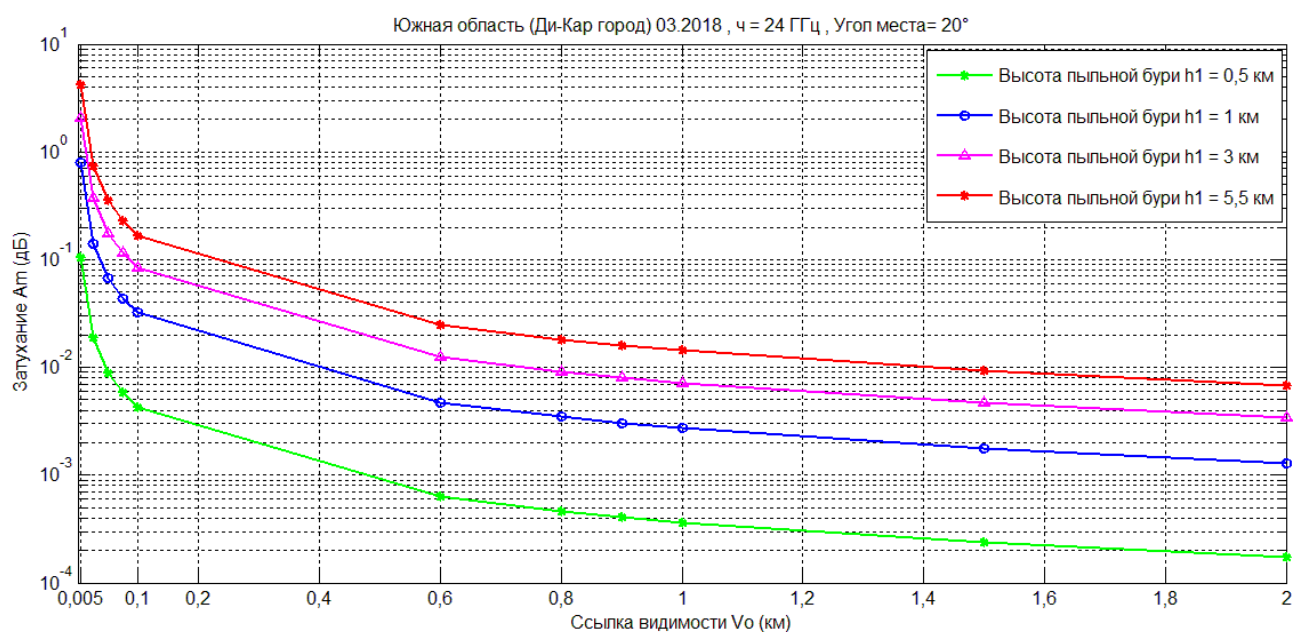


Рисунок 4.13. Влияние высоты пыльной бури на затухание на частоте 24 ГГц

На рисунке (4.14) показано затухание 0,1626, 1,2197, 3,2053 и 6,3985 дБ при высоте пыльной бури $h_1 = 0,5, 1, 3$ и $5,5$ км соответственно, полученное при исходной видимости $0,005$ км, при $F = 37$ ГГц и $\theta = 20^\circ$. В Ираке, в южной области, городе Ди -Кар в марте 2018 г..

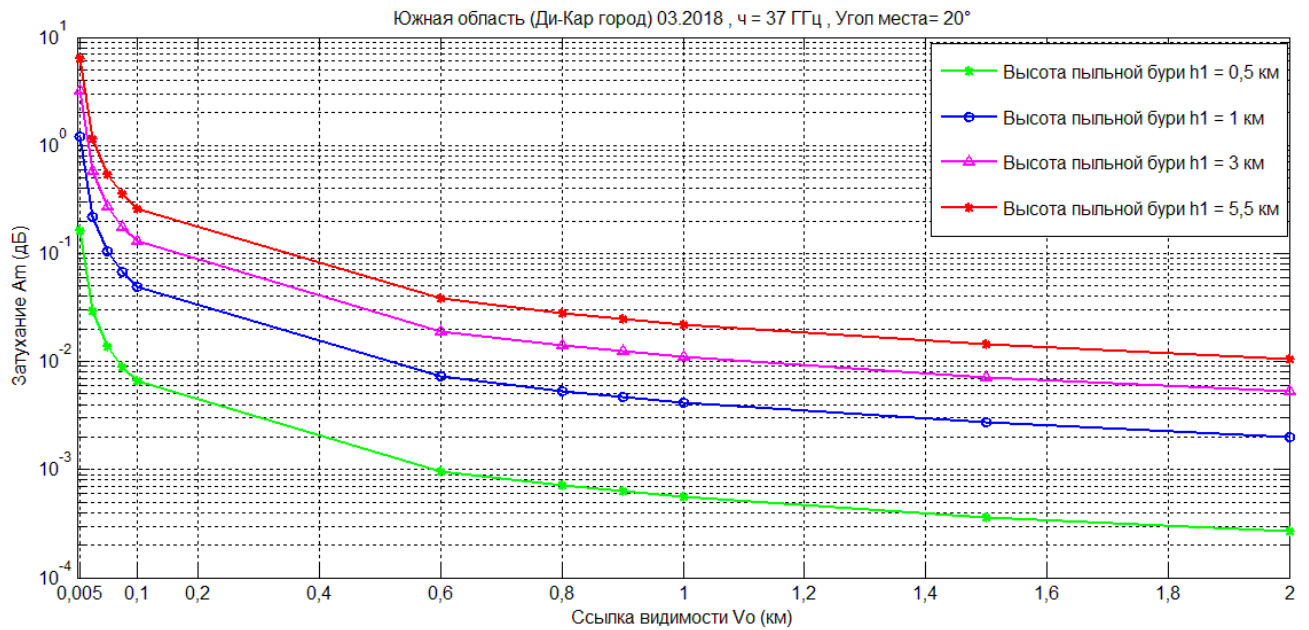


Рисунок 4.14. Влияние высоты пыльной бури на затухание на частоте 37 ГГц

Более того, когда высота пыльной бури равна 0,5, 1, 3 и 5,5 км, частоты $F = 10, 14, 24$ и 37 ГГц, эталонная видимость 0,005 км и угол места 20° , полученное затухание показано в таблице (4.4).

Таблица 4.4 Значения затухания при различных высотах пыльных бурь и различных частотах.

высота пылевой бури h_1 , км	0,5	1	3	5,5
Частота (ГГц)	Затухание, дБ			
10	0,0439	0,3297	0,8663	1,7293
14	0,0615	0,4615	1,2128	2,4211
24	0,1055	0,7912	2,0791	4,1504
37	0,1626	1,2197	3,2053	6,3985

На рис. (4.15) показана зависимость затухания от высоты пылевой бури для частот $F = 10, 14, 24$ и 37 ГГц, изображенных зеленым, синим, розовым, и красным соответственно, где исходная видимость $V_0 = 0,1$ км и угол места $= 30^\circ$.

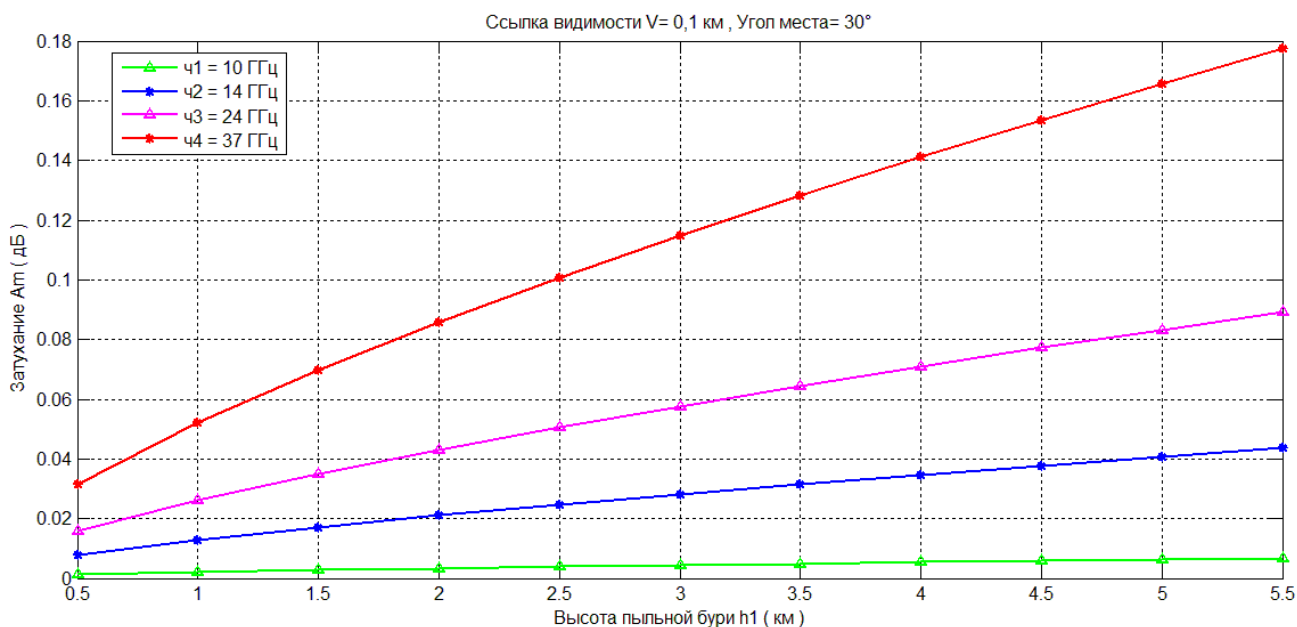


Рис. 4.15 Затухание в зависимости от высоты пылевой бури.

Анализ полученных результатов.

- Общая наблюдаемая тенденция—это увеличение величины ослабления по мере увеличения высоты пыльных бурь. Причина в том, что волна проходит большее расстояние при более высоких пыльных бурях.
- Затухание очень незначительно увеличивается на частоте 10 ГГц, умеренно на 14, 24 ГГц и быстро на 37 ГГц в диапазоне 0,5 - 5,5 км.
- Разница в значениях затухания примерно одинакова для четырех частот в диапазоне 0,5 - 2 км и становится все больше и больше, как только мы достигаем 5,5 км.

Кроме того, при высоте пылевой бури 0,5, 2, 4 и 5,5 км, частотах $F= 10, 14, 24$ и 37 ГГц, опорной видимости $0,1$ км и угле места $= 30^\circ$ полученное затухание показано в таблице (4.5).

Таблица 4.5 Значения затухания при различных высотах пылевой бури и различных частотах.

высота пылевой бури h_1 , км	0,5	2	4	5,5
Частота (ГГц)	Затухание, дБ			
10	0,0012	0,0033	0,0054	0,0068
14	0,0078	0,0211	0,0347	0,0437
24	0,0159	0,0431	0,0709	0,0892
37	0,0316	0,0857	0,1411	0,1774

§ 4.4. Затухание радиосигнала при поднимающейся пыли и во время пылевой бури

Поднимающаяся пыль – это явление, которое возникает, когда скорость ветра находится в пределах 4 - 7 м/с. Такой ветер может поднять частицы пыли примерно до 1 - 3 км над поверхностью Земли, а дальность видимости составляет 1 км или более.

На рис. 4.16 показано фото надвигающейся пыльной бури.



Рисунок 4.16. Пыльная буря в Ираке

Сравним минимальные и максимальные значения затухания волн в двух условиях, поднимающейся пыли и пылевой бури, для двух значений частот $F=10$ и 37 ГГц.

На рисунке (4.17) показана связь между затуханием и эталонной видимостью на частоте 10 ГГц, при угле места $\theta = 30^\circ$ и высоте пылевой бури $h_1=4$ км. На графике синим цветом выделено затухание сигнала в поднимающейся пыли, а красным цветом в пыльной буре

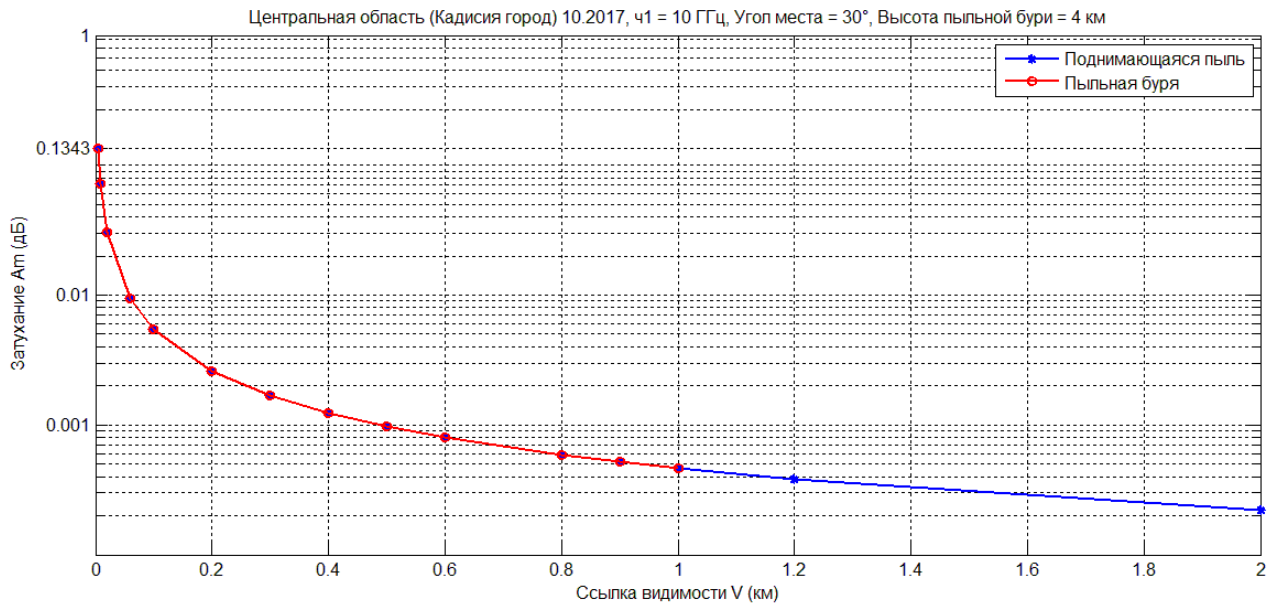


Рис. 4.17. Затухание в поднимающейся пыли и пылевой буре, $F=10$ ГГц

Анализ полученных результатов.

- Уменьшение опорной видимости приводит к увеличению затухания волны.
- Диапазон видимости в поднимающихся пылевых явлениях от 1 до 2 км.
- В пылевой буре видимость от 0,005 до 1 км.
- Затухание быстро увеличивается при видимости в пылевой буре от 1 до 0,005 км, но при поднимающейся пыли затухание растет медленно.

На рисунке 4.18 показана связь между затуханием и эталонной видимостью на частоте 37 ГГц. Все эти результаты наблюдались и зафиксированы в Ираке в городе Кадисия в октябре 2017 года.

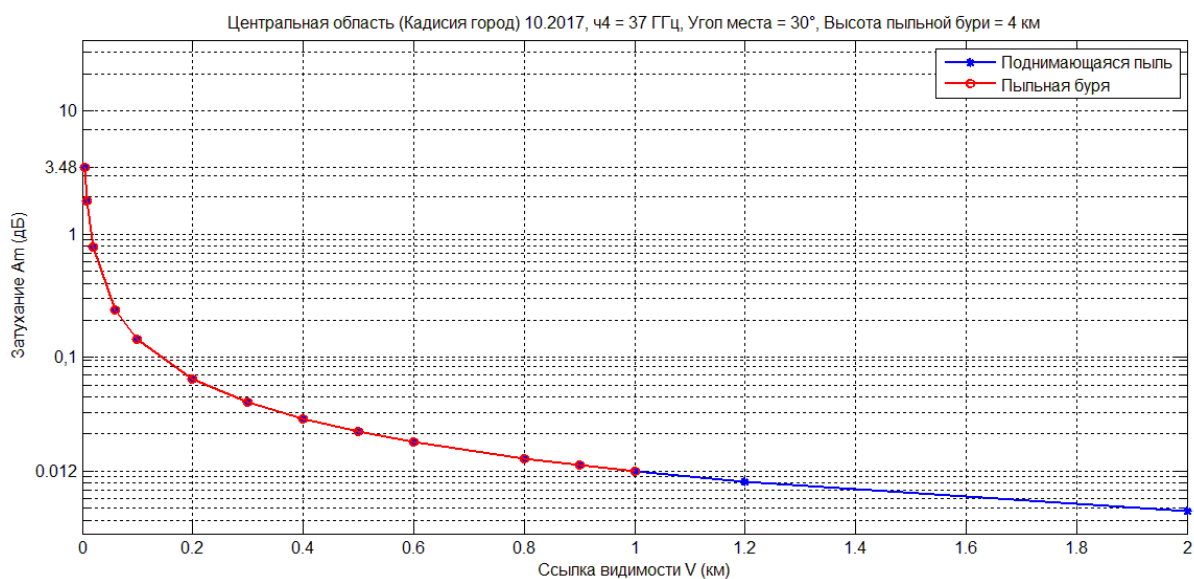


Рис. 4.18. Затухание в поднимающейся пыли и пылевой буре, $F=37$ ГГц

В таблице ниже приведены некоторые статистические значения из реальных данных в тех же двух категориях - поднимающаяся пыль и пыльная буря.

Таблица 4.6. Видимость и затухание для поднимающейся пыли и пылевой бури.

Частота (ГГц)	Поднимающаяся пыль		Пыльная буря	
	Ссылка Видимость (км)	Затухание (дБ)	Ссылка Видимость (км)	Затухание (дБ)
10	1	0,0004	0,005	0,1343
	2	0,0002	1	0,0004
37	1	0,012	0,005	3,48
	2	0,0057	1	0,012

Общей тенденцией является наличие затухания радиоволн при поднимающейся пыли и рост интенсивности затухания при возникновении пылевой бури.

Затухание при поднимающейся пыли и пылевой буре для различных частот. В таблице 4.7. показано экспериментально полученное среднеемесячное затухание в двух категориях (поднимающаяся пыль и пыльная буря) в октябре 2017 года в центральной области Ирака, в городе Кадисия.

Таблица 4.7. Среднемесячное затухание при поднимающейся пыли и буре.

Частота (ГГц)	Поднимающаяся пыль	Пыльная буря
	Среднемесячное затухание (дБ)	Среднемесячное затухание (дБ)
10	0,0003	0,0254
14	0,0023	0,1681
24	0,0046	0,3434
37	0,0092	0,6830

Сравним среднеемесячное затухание в поднимающейся пыли и пылевой буре, для диапазона частот от 10 до 37 ГГц.

На рис. 4.19 показана зависимость среднеемесячного затухания от частоты при поднимающейся пыли и при пылевой буре (угол места $\theta = 30^\circ$ и высота пылевой бури $h_1 = 4$ км, в центральной области Ирака, город Кадисия, октябрь 2017 г.).

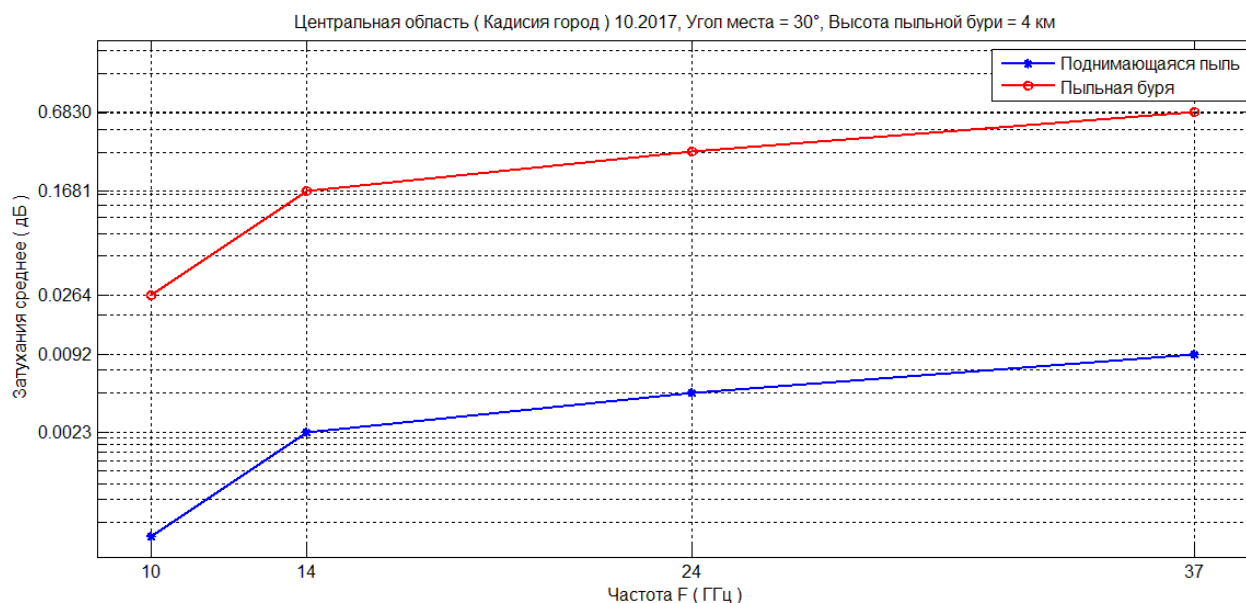


Рис. 4.19. Затухание в поднимающейся пыли и в пылевой буре

Анализ полученных результатов.

- Среднемесячное затухание в пылевой буре всегда выше, чем у поднимающейся пыли для любой частоты.
- Среднемесячное затухание быстро увеличивается с ростом частоты.
- Большая разница в затухании среднемесячного значения между поднимающейся пылью и пыльной бурей почти одинакова во всем диапазоне частот от 10 ГГц до 37 ГГц.

§ 4.5. Рекомендации для разработчиков линий связи

1. Пыльные бури часто возникают в районах с засушливым континентальным климатом, например в Ираке. Однако их появление не регулярно во времени. Поэтому принимать предварительный запас энергопотенциала на возможное затухание сигналов в пыльных бурях при проектировании линий связи спутник-Земля не целесообразно.

2. Для решения проблемы компенсации затухания, возникающего из-за мощных пыльных бурь, кроме уже используемых методов помехоустойчивого кодирования сигналов, можно предложить на наземных станциях спутниковой связи применять методы пространственно-разнесенного приема. Это позволит исключить возможные перерывы связи без изменения частотных параметров линии связи.

Выводы по главе 4.

1. На основании экспериментальных данных, полученных во время пылевых бурь в Ираке, исследовано влияние высоты бури на видимость и взаимосвязь концентрации пыли и видимости.

2. Определено влияние высоты бури и угла места приемных антенн земных станций линий связи КА-Земля на затухание сигналов разных частотных диапазонов.

3. Величина затухания сигналов на линии связи спутник-Земля зависит от видимости, частоты, угла места и высоты пылевых бурь:

- затухание увеличивается, когда видимость уменьшается во время поднимающейся пыли и пыльных бурь;

- рост частоты приводит к увеличению общего затухания, в том числе и затухания из-за пыльных бурь;

- меньший угол места приводит к росту затухания при той же высоте пыльной бури, например, в Ка диапазоне снижение угла места до 10° вызывает рост затухания в 5 раз;

- при увеличении высоты пыльных бурь величина затухания растет нелинейно, например, при увеличении высоты пыльной бури в 2 раза, затухание сигналов увеличивается в 1,6 раза.

4. На основании разработанной математической модели предложен алгоритм расчета затуханий сигнала во время пыльных бурь.

5. Определено, что затухание при видимости в пыльных бурях менее 5 м на частотах Ка диапазона превышает 6,4 дБ, что может приводить к продолжительным срывам связи.

6. Разработаны практические рекомендации для предотвращения срывов связи из-за пыльных бурь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В радиоканалах затухание КА-Земля ослабление сигнала происходит при его распространении в свободном пространстве и в атмосферных газах, из-за наличия гидрометеоров, многолучевости и из-за пылевых и песчаных бурь.

2. Пыльные и песчаные бури имеют значительную протяженность во времени и ослабление сигнала из-за них может приводить к длительным срывам связи и влиять на качество и надежность телекоммуникационных услуг.

3. Предложена классификация, разделяющая пылевых явления на взвешенную пыль, поднимающуюся пыль, пыльные бури и песчаные бури.

4. Величина затухания сигналов на линиях связи КА-Земля во время пыльных бурь зависит от видимости, частоты, угла места и высоты пылевых бурь:

- затухание увеличивается на несколько децибел, когда видимость уменьшается во время поднимающейся пыли и пыльных бурь, например, при видимости 100 м затухание Ка сигналов в буре высотой 4 км составляет 0,15 дБ, а при видимости 5 м уже 2.0 дБ;

- рост частоты приводит к увеличению общего затухания, в том числе и затухания из-за пыльных бурь, например, при $f=10$ ГГц затухание в буре высотой 4 км при видимости 100 м равно 0,05 дБ, а при $f=37$ ГГц уже 0,15 дБ;

- меньший угол места приводит к более высокому затуханию при той же высоте пыльной бури, на границах приема увеличиваясь до 5 раз;

- при увеличении высоты пыльных бурь величина затухания нелинейно растет.

5. Предложен критерий оптической видимости в пыльных образованиях, позволяющий рассчитывать ослабление радиосигналов пыльными бурями.

6. Разработана математическая модель и алгоритм расчета затухания спутниковых радиосигналов на линиях связи КА-Земля в зависимости от пылевых явлений.

7. Определено, что затухание при видимости в пыльных бурях менее 5 м на частотах Ка диапазона может превышать 6,4 дБ.

8. Предложены практические рекомендации для компенсации затухания, возникающего из-за мощных пыльных бурь, основой которых является применение методов пространственно-разнесенного приема на наземных станциях спутниковой связи.

Список литературы

1. Электронный ресурс. Код доступа: <https://www.rfpage.com/what-are-radio-frequency-bands-and-its-uses/>
2. Зубарев Ю.Б., Самойлов А.Г. Развитие мобильной связи пятого поколения / Научные технологии. – 2018, №1. – С. 37-43.
3. Зубарев Ю.Б., Самойлов А.Г. Моделирование и имитация радиоканалов подвижной связи поколения 5G. / Проектирование и технология электронных средств, 2018, №2. - С.27-33.
4. Muhammad Zubair, Zaffar Haider, Shahid A. Khan, and Jamal Nasir, Atmospheric influences on satellite communications / Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2011, № 5. – С. 261 - 264.
5. Z. Pi, and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems,” IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, Jun. 2011.
6. Электронный ресурс. Код доступа: <https://www.ferra.ru/news/techlife/day-in-tech-history-december-18-18-12-2017.htm>
7. Камнев Е., Белов А., Бобков В. "Глобсатком" - новая система спутниковой связи на базе КА на высоких эллиптических орбитах. - Connect. - 2007, декабрь. - С. 156-160.
8. Электронный ресурс. Код доступа: <https://topwar.ru/125718-amerikanskije-voennye-zapustili-na-orbitu-sputnik-razvedchik.html>
9. Макаренко С.И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. - 2016, №4. - Электронный журнал. Код доступа: <https://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/09-Makarenko.pdf>.
10. Полушин П.А., Самойлов А.Г. Избыточность сигналов в радиосвязи / Под ред. А.Г. Самойлова. - М.: Радиотехника, 2007. – 256с.
11. Самойлов А.Г., Куракова Т.П., Массонжи Л.Д. Моделирование замираний сигналов миллиметрового диапазона волн // Международная научно-

техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2018. - Рязань.- Сб. тр.- Т.1. - С.22-26.

12. Samoylov A.G., Samoylov S.A., Kurakova T.P. Modeling of Radio Channels of Millimeter Waves Range // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.- IEEE Catalog Number: CFP18O83-POD ISBN (Print-On-Demand): 978-1-5386-5623-5 ISBN (Online): 978-1-5386-5622-8.- Moscow, Russia 14-15 March 2018, pp. 314-317.

13. Ruike Y., Zhensen W., Jinguang Y. The study of MMW and MW attenuation considering multiple scattering effect in sand and dust storms at slant paths, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 24, № 8, August 2003, pp. 1383-1392.

14. Рекомендация МСЭ-R P.836-4 (10/2009) Водяные пары: плотность у поверхности Земли и общее объемное содержание. Серия Р. Распространение радиоволн.

15. Рекомендация МСЭ-R P.837-5 Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн. Серия Р. Распространение радиоволн.

16. Рекомендация МСЭ-R P. 618-10 (10/2009) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос. Серия Р. Распространение радиоволн.

17. Электронный ресурс. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Орбита_\"Молния\"](https://ru.wikipedia.org/wiki/Орбита_\).

18. Рекомендация МСЭ-R P.525-2. Расчет ослабления в свободном пространстве.

19. Recommendation ITU-R P.676-9 (02/2012) Attenuation by atmospheric gases.

20. Самойлов А.Г., Жоау А.Ф. Оценка замираний сигнала на линиях спутниковой связи / Проектирование и технология электронных средств. -2014, № 2. - С. 19-25.

21. Самойлов А.Г., Самойлов С.А., Альшрайдэх А.М., Жоау А.Ф. Имитация многолучевых каналов передачи информации // Проектирование и технология электронных средств. - 2014, № 2. - С. 12-18.
22. C.F. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design.(3rd Edition). John Wiley & Sons Inc. New York. 2005.
23. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. 2006. Институт солнечно-земной физики. – Иркутск : – 480с.
24. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М. : Мир. 1973. – 502 с.
25. В. Б. Белаховский, Я. Джин, В. Милош Сравнение воздействия различных типов ионосферных возмущений на сцинтилляции GPS-сигналов в высоких широтах. - Труды Кольского научного центра РАН. - 2017, т.8, № (7-3). - С.81-85.
26. Справочник по радиоастрономии. Издание третье. - ИТУ. - Бюро радиосвязи. - Женева. - 2013. - 190 с.
27. Садомовский А. С. / Приёмо-передающие радиоустройств и системы связи. / Ульяновск - 2007 - С. 243.
28. Martin Hall, Les Barclay, Propagation of Radio waves / 2nd edition, The Institute of Electrical Engineers, London, UK, № 7. – С.182-186.
29. Claudio Paris, Maurizio Parisse, Augusto Nascetti, Roberto Cica, Nabeel Abdulhussein Salman. A nanosatellite optical payload for detecting dust and sand storms. // Centro Fermi and SIA, Sapienza University of Rome. Rome, Italy.
30. Esmail Mohamed Abuhdim, Ibrahim Mohamed Saleh. Effect of sand and dust storms on microwave propagation signals in southern Libya / General communication Department, General post and telecommunication company, Tripoli, Libya.
31. Xiao-Ying Dong, Hsing-Yi Chen, Senior Member, IEEE, and Dong-Hui Guo, Member, IEEE. Microwave and Millimeter-Wave Attenuation in Sand and Dust Storms / IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 10, 2011.

32. O.P.N. Calla, and J.S. Purohit. Study of effect of rain and dust on propagation of radio waves at millimeter wavelength / International Centre for Radio Science, 'OM NIWAS' A-23 Shastri Nagar Jodhpur – 342003.
33. T. Pratt, C. Bostian, and J. Allnut. Satellite Communications, 2nd Edition, Wiley, 2003.
34. A. Musa and B. S. Paul. Microwave Attenuation along Earth-Satellite Link During Dust Storms / Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Pretoria / Johannesburg, South Africa, October 29 – November 1, 2018.
35. A G Samoylov, S A X Nasir. Satellite Radio Channels Simulation Methodology. International Scientific Conference "CAMSTECH - 2020: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 919 (2020) 042012 IOP Publishing Krasnoyarsk, Russia, July 31, 2020. doi:10.1088/1757-899X/919/4/042012
36. Электронный ресурс: <https://www.interfax.ru/russia/729414> Дата доступа 15.03.2021.
37. Hoda Abbas Hamid Al-Lami. Dust in Iraq / Ministry of transportation, Iraqi Meteorological Organization And Seismology, Department of Research and Studies, 2012.
38. Hoda Abbas Hamid Al-Lami. Definition of dust storms and their types / Ministry of transportation, Iraqi Meteorological Organization and Seismology, Department of Research and Studies, 2012.
39. W. S. Chepil , and N. P. Woodruff. Sedimentary Characteristics of Dust Storms-II: Visibility and Dust Concentration / Am. J. Sci., vol. 255, pp. 104-114, 1957.
40. Musa, A., and Bashir, S. O., Electromagnetic Waves Propagation in Dust Storms at Millimeter Wave Band, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS), vol. 4, no. 2, pp. 162-167, SCHOLAR Link Research Institute Journal (ISSN: 2141-7016), 2013.

41. Рекомендация МСЭ-R P.618-10 (10/2009) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос Серия Р Распространение радиоволн. - 24 с.
42. Рекомендация МСЭ-R P.618-13 (12/2017) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос Серия Р Распространение радиоволн. - 27 с.
43. Э. Терраделлас, С. Никович и Сяо-Е Чжан Воздушная пыль: опасность для здоровья человека, окружающей среды и общества. Бюллетень 17-го Всемирного метеорологического конгресса. - Том 64 (2) - 2015.
44. Клумов Б. А., Морфилл Г. Е., Попель С. И. Формирование структур в запыленной ионосфере / ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127, № 1. С. 171–185.
45. Zakharov A., Hor'anyi M., Lee P., Witasse O., Ciriani F. Dust at the Martian moons and in the circummartian space / Planet. Space Sci. – 2014. – Vol. 102. – P. 171–175.
46. Dlugach Z. M., Korablev O. I., Morozhenko A. V., Moroz V. I., Petrova E. V., Rodin A. V. Physical properties of dust in the Martian atmosphere: analysis of contradictions and possible ways of their resolution // Solar Syst. Res. – 2003. – Vol. 37. – P. 1–19.
47. Ghobrial, S. I., and Sharif, S. M. / Microwave attenuation and cross polarization in dust storms, IEEE Transactions Antennas Propagation, Vol. AP-35, pp 418-425, 1987.
48. <https://www.newscientist.com/article/dn14089-radio-waves-from-earth-clear-out-space-radiation-belt/>.
49. <https://pwg.gsfc.nasa.gov/Education/Iradbelt.html>.
50. https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/mission/fun-facts.html.
51. Вернов С. Н., Вакулов П. В., Логачев Ю. И., Радиационные пояса Земли, в сборнике: Успехи СССР в исследовании космического пространства, М., 1968, с. 106;
52. Тверской Б. А., Динамика радиационных поясов Земли, М., 1968;

53. Редерер Х., Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем, пер. с англ., М., 1972;
54. Хесс В., Радиационный пояс и магнитосфера, пер. с англ., М., 1972;
55. Шабанский В. П., Явления в околоземном пространстве, М., 1972;
56. Гальперин Ю. И., Горн Л. С., Хазанов Б. И., Измерение радиации в космосе, М., 1972.
57. Barclay, Les, ed. Propagation of radiowaves. Vol. 502. Iet, 2003.
58. Recommendation ITU-R P.525-4, P Series Radiowave propagation, ITU-R Radiocommunication Sector of ITU, "Calculation of free-space attenuation", Aug., 2019.
59. Islam, Rafiqul MD, Yusuf A. Abdulrahman, and Tharek A. Rahman. "An improved ITU-R rain attenuation prediction model over terrestrial microwave links in tropical region." EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2012.1 (2012): 1-9.
60. Tsukamoto, Katsutoshi, Akira Hashimoto, Yuji Aburakawa, and Mitsuji Matsmoto. "The case for free space." IEEE microwave magazine 10, no. 5 (2009): 84-92.
61. Will, S., Kudyshev, Z. A., & Litchinitser, N. M. (2015). Free-space components for microwave transmission. Photonics and nanostructures-fundamentals and applications, 13, 1-7.
62. Barué, G., 2008. Microwave engineering: land & space radiocommunications (Vol. 9), John Wiley & Sons.
63. Islam, M. R., & Tharek, A. R. (1999, November). Propagation study of microwave signals based on rain attenuation data at 26 GHz and 38 GHz measured in Malaysia. In 1999 Asia Pacific Microwave Conference. APMC'99. Microwaves Enter the 21st Century. Conference Proceedings (Cat. No. 99TH8473) (Vol. 3, pp. 602-605), IEEE.
64. Carlos Jorge Rodrigues Capela, Prof. Sérgio Reis cunha. "Protocol of communications for vorsat satellite - link budget", Universidade do Porto, Electrical Engineering, April 2012.

- 65 Glen Feldhake, Estimating the attenuation due to Combined Atmospheric Effects on Modern Earth-Space Paths, IEEE Antennas and Propagation Magazine, August 1997, Vol. 39, No. 4.
66. A.G. Samoylov, V.S. Samoylov, S. A. X. Nasir. Loss of radio waves energy on radio lines satellite-earth station. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2094, Engineering and Materials Science. 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2094 042080. doi:10.1088/1742-6596/2094/4/042080
67. Recommendation ITU-R P.676-10 (09.2013) Attenuation by atmospheric gases P Series Radiowave propagation Switzerland: Geneva.
68. A G Samoylov, S A Samoylov, S A Nasir and I A Al Tahar. "Radio links from low-orbit satellites". 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 862 022030
DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022030.
69. Martin Hall, Les Barclay, Propagation of Radiowaves, 2nd edition, The Institute of Electrical Engineers, London, UK.
70. Hum, Sean Victor. "Radio and microwave wireless systems." Copyright© Sean Victor Hum (2007).
71. Recommendation ITU-R P.838, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," 1992.
72. Жоую, Пи Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / Жоую Пи, Фарук Хан // Электроника: наука, технологии, бизнес. - 2012, № 3. - С. 86 - 94.
73. Recommendation ITU-R P.1815-1 (10.2009) Differential attenuation in the rain P Serie. Radiowave propagation. Switzerland, Geneva.
74. Самойлов А.Г., Жоау А.М. Оценка замираний сигнала на линиях спутниковой связи. / Проектирование и технология электронных средств, 2014, №2. - С.19-25.
75. L. Ippolito, Radiowave Propagation in Satellite Communication, New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1986, p. 64.

76. A G Samoylov and S A X Nasir "Satellite radio channels simulation methodology" 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 919 042012. DOI:10.1088/1757-899X/919/4/042012
77. Braasch, M.S. On the Characterization of Multipath Errors in Satellite-Based Precision Approach and Landing Systems. Ph.D. Thesis, Ohio University, Athens, OH, USA, 1992.
78. Irsigler, M. Multipath Propagation, Mitigation and Monitoring in the Light of Galileo and the Modernized GPS. Ph.D. Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, University FAF Munich, Neubiberg, Germany, 2008.
79. Рекомендация МСЭ-R P.833-5 Ослабление сигналов растительностью.- С.1-13.
80. Рекомендация МСЭ-R P.2040. Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц. - 54 с.
81. Phelts, R.E. Multicorrelator Techniques for Robust Mitigation of Threats to GPS Signal Quality. Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2001.
82. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More; Springer: Wien, Austria, 2008.
83. Braasch, M.S. Multipath. In Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems; Teunissen, P.J., Montenbruck, O., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 443–468.
84. Kalyanaraman, S.K. A Comparative Study of Advanced Multipath Mitigating Global Positioning System Receiver Architectures. Ph.D. Thesis, Ohio University, Athens, OH, USA, 1999.
85. Townsend, Bryan R., et al. "Performance evaluation of the multipath estimating delay lock loop." Navigation 42.3 (1995): 502-514.

86. Simsky, A., Mertens, D., Sleewaegen, J. M., Hollreiser, M., & Crisci, M. (2008). Experimental results for the multipath performance of Galileo signals transmitted by GIOVE-A satellite. *International Journal of Navigation and Observation*, 2008.
87. A. G. Samoylov and S. A. Samoylov, "Mathematical Model of the Radio Channel Altimeter for Unmanned Aerial Vehicles," 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2019, pp. 1-4, DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706816.
88. Jakeman E., Tough R.J.A. Non-Gaussian models for the statistics of scattered waves / *Advances in Physics*, 1988, v. 37 (5). - pp. 471-529.
89. Nakagami M. The m-Distribution a General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading. - *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, N.York, 1960. - 190 p.
90. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. - М.: Связь. - 1969. - 375 с.
91. Галкин А.П., Лапин А.Н., Самойлов А.Г. Моделирование каналов систем связи. - Москва. Связь. 1979 г. - 96 с.
92. Самойлов А.Г. Имитаторы многолучевых радиоканалов / Проектирование и технология электронных средств. - № 4, 2003. - С. 32-36.
93. Самойлов А.Г., Самойлов С.А., А.М. Альшрадэх, Жоау А.М. Имитация многолучевых каналов передачи информации / Проектирование и технология электронных средств, 2014, №2. - С.12-18.
94. Leontyev V.V. Probabilistic model of centimeter radio wave scattering facility located near an agitated marine surface. / *Journal of Technical Physics*, 1997, Vol. 67, No. 9. - pp. 83-88.
95. A. S. Ahmed, Role of particle-size distributions on millimeter-wave propagation in sand and dust storms. / *IEEE Proc. H Microwaves Antennas Propagation*, Feb. 1987. - vol. 134. - No. 1. - pp. 55-59.

96. D. A. Gillette. / Environmental Factors Affecting Dust Emission by Wind Erosion / American Association for the Advancement of Science Annual, The Desert Dust Symposium volume, 1977.
97. E. M. Patterson, and D. A. Gillette. / Measurements of visibility vs. mass-concentration for airborne soil particles / National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80303, U.S.A., Pergamon Press 1977. Atmospheric Environment - Vol. 11. - pp. 193-196.
98. Qun-Feng Dong, Li-Xin Guo, Ying- Li, Hui Zhang, and Ming-Jun Wang. Effect of sand and dust storms on microwave propagation in Earth-satellite links / IEEE Antennas & Propagation Magazine, February 2017. - 1045-9243/17©2017IEEE.
99. Самойлов А.Г., Самойлов С.А., Алшрайдех А.М., Жоау А.Ф. Моделирование многолучевых каналов передачи информации / Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 2. С. 1218.
100. Самойлов А.Г., Жоау А.Ф. Оценка помех на спутниковых линиях / Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 2. С. 19-25.
101. Альшрайдех А.М., Самойлов А.Г. Верификация устройств помехоустойчивого кодирования / Проектирование и технология электронных средств. 2013. № 1. С. 48-51.
102. Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Разработка комплекса имитации многолучевых радиоканалов / Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 3. С. 28-32.
103. Ghobrial S. I., "The effect of sand storms on microwave propagation," Proc. Nat. Telecommun. Conf., Vol. 2, Proc. No. CH1539-6 / 80 / 0000-0216, 43.5.1-43.5.4, Houston, TX, 1980.
104. Ghobrial S. I. and S. M. Sharief, "Microwave attenuation and cross polarization in dust storms," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-35, 418-425, Apr. 1987.
105. Ruike Y., W. Zhensen, and Y. Jinguang, "The study of MMW and MWattenuation considering multiple scattering effect in sand and dust storms at slant paths," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 24, No. 8, Aug. 2003.

106. Abdulwaheed Musa, Saad O. Bashir, and Aisha H. Abdalla. Review and Assessment of Electromagnetic Wave Propagation in Sand and Dust Storms at Microwave and Millimeter Wave Bands - Part I. / Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 40, 91–100, 2014.
107. Sami M. Sharif, Dust Storms Properties Related to Microwave Signal Propagation / Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Khartoum, Khartoum, Sudan / UofKEJ Vol. 1 Issue 1 pp. 1-9 (June 2011).
108. Bertrand J., Baudet J. and Drochon A., Importance des aerosols naturels en Afrique de L'ouest. J. Recherches Atmos. 8, 845-860 (1974).
109. Charlson R. J., Atmospheric visibility related to aerosol mass concentration. Environ. Sci. Technol. 3, 913-918 (1969).
110. Работы Иракской метеорологической организации. 2021 г.

Приложение 1. Статистика пыльных бурь в Ираке

Месяцы	Видимость в городах Ирака, м. 2016 год							
	Мутана	Кадисия	Ди-Кар	Басра	Рутба	Ниневия	Киркук	Багдад
Январь								
Февраль							500	
Март			300					500
Апрель		800	300					
Май		800	800					600
Июнь	600		400					100
Июль			800					400
Август								
Сентябрь								
Октябрь		400						
Ноябрь								700
Декабрь								
Видимость в городах Ирака, м. 2017 год								
Месяцы	Мутана	Кадисия	Ди-Кар	Басра	Рутба	Ниневия	Киркук	Багдад
Январь								

Февраль	500							
Март	500		200	200				
Апрель					400			800
Май	600	800	200	500			200	400
Июнь			800					
Июль								
Август								
Сентябрь								
Октябрь	500	5	300			800		100
Ноябрь								
Декабрь	500							900

Видимость в городах Ирака, м. 2018 год

Месяцы	Мутана	Кадисия	Ди-Кар	Басра	Рутба	Ниневия	Киркук	Багдад
Январь	600	100						700
Февраль	500	500	800					
Март		200	5				400	500
Апрель			500					400
Май	25	200	100			300		500
Июнь			500					500

Июль			400					
Август			200				200	
Сентябрь								
Октябрь	600	100	300			300	400	400
Ноябрь		500						
Декабрь								

Видимость в городах Ирака, м. 2019 год
(не полные данные из-за военных действий)

Месяцы	Мутана	Кадисия	Ди-Кар	Басра	Рутба	Ниневия	Киркук	Багдад
Январь	800	50						
Февраль								
Март								
Апрель			800					
Май								
Июнь						700		

Приложение 2. Акты внедрения результатов работы

MINISTRY OF TRANSPORTATION Iraqi Meteorological Organization & Seismology		وزارة النقل الهيئة العامة للأرصاد الجوية والرصد الزلزالي
Regional Training Center Ref. No.: 8 / 5 Date: 5 / 12 / 2021		مركز التدريب الاقليمي العدد: 8 / 5 التاريخ: 2021 / 12 / 05

To: Vladimir State University
Subject: Research Cooperation

Dear A.A. Panfilov
Vice-Rector of the University
Referring to your letter no.48/5802 dated on 25/10/2021

The Iraqi Meteorological Organization and Seismology (IMO) welcomes research cooperation, provided that there are no financial consequences, and to benefit from the results of the PhD thesis that was completed by the student (Nasir Samah Abbas Hassan).

With best regards



Ali Mohsin Hashim
Director General of Iraqi Meteorological
Org. & Seismology

5 / 12 / 2021

www.meteoseism.gov.iq

Email: info@meteoseism.gov.iq
Mobile: +964 7712236468

Code	(QP-02-04)	ISSUE	02	2017/12/26	Revision	00	2017/12/26
------	------------	-------	----	------------	----------	----	------------

Республика Ирак
Министерство транспорта
Иракская служба по метеорологии и
сейсмологии
Региональные образовательный центр
№ 8/5
Дата 05.12.2021

Владимирский государственный
университет
Уважаемому А.А. Панфилову
Проректору университета по ОД

Тема: Акты внедрения

Ссылаясь на Ваше письмо № 48 / 5802 от 25.10.2021, Иракская служба по метеорологии и сейсмологии (ИМО) приветствует научно-исследовательское сотрудничество при условии отсутствия финансовых последствий и готова использовать результаты кандидатской диссертации соискателя (Насир Самах Аббас Хассан).

Печать: Иракская служба по
метеорологии и сейсмологии
Региональные образовательный центр

Подпись начальника иракской
службы по метеорологии и
сейсмологии
Хашим Али Мохсин
05.12.2021

www.meteoseism.gov.i

e-mail: infor@meteoseism.gov.i

тел.: +964 7712236468

Перевод с английского и арабского языка сделан переводчиком:
Аль-Хайдри Валид Ахмед



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности
ФГБОУВО Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых - (ВлГУ)



А. А. Панфилов

21 февраля 2022 г.

Акт внедрения

результатов диссертационного исследования аспиранта Насира Самаха Аббаса Хассана, выполненного на тему "Исследование радиоканалов спутниковой радиосвязи" по специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

В ходе выполнения диссертационной работы С.А.Х. Насиром получены новые научные результаты, а именно: математическая модель затухания спутниковых радиосигналов в пыльных бурях; выражения для оценки ослаблений сигнала в зависимости от видимости, высоты бури, угла места антенн и используемого диапазона частот; предложенные рекомендации по компенсации влияния пыльных бурь на услуги спутниковой связи. Эти результаты будут использованы при чтении лекций магистрам направления 11.04.01 - Радиотехника по курсам "Статистическая теория связи" и "Радиотехнические системы передачи информации".

Лектор учебных курсов

А.Г. Самойлов

Ио заведующего кафедрой РТи РС

Н.Н. Корнеева

14.02.2022 г.

Приложение 3. Свидетельство о регистрации приграммы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612652

Программа моделирования и исследование затухания радиосигналов в каналах спутниковой связи из-за пыльных бурь в Ираке

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича Николая Григорьевича Столетовых» (RU)*

Автор(ы): *Насир Самах Аббас Хассан (RU)*

Заявка № 2022611915

Дата поступления 15 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение 4. Программа моделирования и исследование затухания радиосигналов в каналах спутниковой связи из-за пыльных бурь.

```
clear all; clc; % To clear workspace
```

```
%% loading files
```

```
v = xlsread('Кадисия 2017.xlsx',10,'B:B'); % Reference Visibility in sheet 1 column
```

```
B
```

```
filter1=find(v<=2); % Find the reference visibility locations (v<=2000 locations)  
with raising dust and dust storm
```

```
v1=v(filter1); % Reference visibility values without dust storm
```

```
filter2=find(v<=1); % Find the reference visibility locations (v<=1000 locations)  
with dust storm only
```

```
v2=v(filter2); % Reference visibility values with Dust
```

```
%% Input & math
```

```
% h1=5.5; %Высота пыльной бури в(км)
```

```
h2=4;
```

```
% h3=2;
```

```
% h4=0.5;
```

```
% th1=20; % УГОЛ места°
```

```
th2=30;
```

```
% th3=40;
```

```
% th4=60;
```

```
% th1=th1*pi/180; % Degree to radian (th1=0.3491)
```

```
th2=th2*pi/180;
```

```
% th3=th3*pi/180;
```

```

% th4=th4*pi/180;

% f1=10; % v1=10 ГГц
% f2=14; % v2=14 ГГц
% f3=24; % v3=24 ГГц
f4=37; % v4=37 ГГц

for i=1:length(v1) %All cases counter from i=1 to 744. In workspace saving the last
counting no.(744)
%
% a11(i)=(0.000578*f1*(h2^0.72)*imag((4.26-0.26i)/(7.26-
0.26i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
%
% a12(i)=(0.000578*f2*(h2^0.72)*imag((4.5-1.3i)/(7.5-
1.3i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
%
% a13(i)=(0.000578*f3*(h2^0.72)*imag((4.1-1.4i)/(7.1-
1.4i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
a14(i)=(0.000578*f4*(h2^0.72)*imag((3-1.3i)/(6-1.3i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
end
for j=1:length(v2) %All cases counter from i=1 to 744. In workspace saving the last
counting no.(744)
%
% a21(j)=(0.000578*f1*(h2^0.72)*imag((4.26-0.26i)/(7.26-
0.26i)))/((v2(j)^1.07)*sin(th2));
%
% a22(j)=(0.000578*f2*(h2^0.72)*imag((4.5-1.3i)/(7.5-
1.3i)))/((v2(j)^1.07)*sin(th2));
%
% a23(j)=(0.000578*f3*(h2^0.72)*imag((4.1-1.4i)/(7.1-
1.4i)))/((v2(j)^1.07)*sin(th2));
a24(j)=(0.000578*f4*(h2^0.72)*imag((3-1.3i)/(6-1.3i)))/((v2(j)^1.07)*sin(th2));
end

%% Smoothing

```

```

vv1=[];vv2=[];

% aa11=[]; % Create a matrix to reduce the repeated visibility values to one value
% aa12=[];
% aa13=[];
aa14=[];

% aa21=[];
% aa22=[];
% aa23=[];
aa24=[];

v1=v1*1000; % Convert fraction no. to integer because the next for function don't
work with fraction
for m=min(v1):max(v1) % Counter i=(min v=50), 51, 52, ..., (max v=20000). Sav-
ing the last value (max v)in workspace
    ind=find(v1==m); % Find the positions of v=50,75,100,..., 20000. Saving the po-
sitions of the last(max)value in workspace
    if (length(ind)>0) % lengh(No. columns)(No. positions, when for example v=50)
        vv1=[vv1 mean(v1(ind))]
%        aa11=[aa11 mean(a11(ind))];
% aa12=[aa12 mean(a12(ind))];
% aa13=[aa13 mean(a13(ind))];
        aa14=[aa14 mean(a14(ind))];
    end
end
vv1=vv1/1000;

```

```

v2=v2*1000;
for n=min(v2):max(v2) % Counter i=(min v=50), 51, 52, ..., (max v=20000). Saving
the last value (max v)in workspace
    ind=find(v2==n); % Find the positions of v=50,75,100,..., 20000. Saving the posi-
tions of the last(max)value in workspace
    if (length(ind)>0) % lengh(No. columns)(No. positions, when for example v=50)
        vv2=[vv2 mean(v2(ind))]

%     aa21=[aa21 mean(a21(ind))];
%     aa22=[aa22 mean(a22(ind))];
%     aa23=[aa23 mean(a23(ind))];
    aa24=[aa24 mean(a24(ind))];
    end
end
vv2=vv2/1000;
%% Plotting
semilogy(vv1,abs(aa14),'b-*',vv2,abs(aa24),'r-o') % letters for curve colour
    xlabel ('Ссылка видимости V (км)');
    ylabel ('Затухание Am (дБ)');
    title('Центральная область (Кадисия город) 10.2017, ч4 = 37 ГГц, Угол места
= 30°, Высота пыльной бури = 4 км')
    legend ('Поднимающаяся пыль','Пыльная буря');
grid on; % Lined paper

```

```

clear all; clc; % Чтобы очистить рабочее пространство

%% Загрузка файлов

v = xlsread('Багдад 2016.xlsx',6,'B:B'); % sheet 6 column B
filter=find(v<=2); % Find the reference visibility locations (v<=2km locations) with
dust storm
v1=v(filter); % Reference visibility values with Dust (v<=2km)

%% Входные данные и математические

h1=5.5; %Высота пыльной бури(км)
% h2=4;
% h3=2;
% h4=0.5;

% th1=20; % Угол места°
th2=30;
% th3=40;
% th4=60;

% th1=th1*pi/180; % Степень до радиана (th1=0.3491)
th2=th2*pi/180;
% th3=th3*pi/180;
% th4=th4*pi/180;

f1=10; % ч1=10 ГГц
f2=14; % ч2=14 ГГц
f3=24; % ч3=24 ГГц

```



```
f4=37; % ч4=37 ГГц
```

```
for i=1:length(v1) % All cases counter from i=1 to 744. In workspace saving the last counting no.(744)
```

```
a1(i)=(0.000578*f1*(h1^0.72)*imag((4.26-0.26i)/(7.26-0.26i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
```

```
a2(i)=(0.000578*f2*(h1^0.72)*imag((4.5-1.3i)/(7.5-1.3i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
```

```
a3(i)=(0.000578*f3*(h1^0.72)*imag((4.1-1.4i)/(7.1-1.4i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
```

```
a4(i)=(0.000578*f4*(h1^0.72)*imag((3-1.3i)/(6-1.3i)))/((v1(i)^1.07)*sin(th2));
```

```
end
```

```
%% Отмена повторяющихся значений видимости
```

```
vv1=[];aa1=[];aa2=[];aa3=[];aa4=[]; % Create a matrix to reduce the repeated visibility values to one value
```

```
v1=v1*1000; % Convert fraction no. to integer because the next for function don't work with fraction
```

```
for j=min(v1):max(v1) % Counter j=(min v1=0.005km)..., (max v1=2km). Saving the last value (max v1) in workspace
```

```
ind=find(v1==j); % Find the positions of v=50,75,100,..., 20000. Saving the positions of the last(max)value in workspace
```

```
if (length(ind)>0) % length(No. columns)(No. positions, when for example v=50)
```

```
vv1=[vv1 mean(v1(ind))];
```

```
aa1=[aa1 mean(a1(ind))];
```

```
aa2=[aa2 mean(a2(ind))];
```

```
aa3=[aa3 mean(a3(ind))];
```

```
aa4=[aa4 mean(a4(ind))];
```

```
end
```

```
end
```

```
vv1=vv1/1000;
```

```
%% Построение рисунки
```

```
plot(vv1,abs(aa1),'g-*',vv1,abs(aa2),'b-o',vv1,abs(aa3),'m-^',vv1,abs(aa4),'r-*') %
```

```
letters for curve colour
```

```
xlabel ('Ссылка видимости V (км));
```

```
ylabel ('Затухание Am (дБ));
```

```
legend ('ч1=10 ГГц','ч2=14 ГГц','ч3=24 ГГц','ч4=37 ГГц');
```

```
title ('Центральная область (Багдад город) 06.2016, Высота пыльной бури= 5,5  
км, Угол места= 30°')
```

```
grid on; % Линованная бумага
```