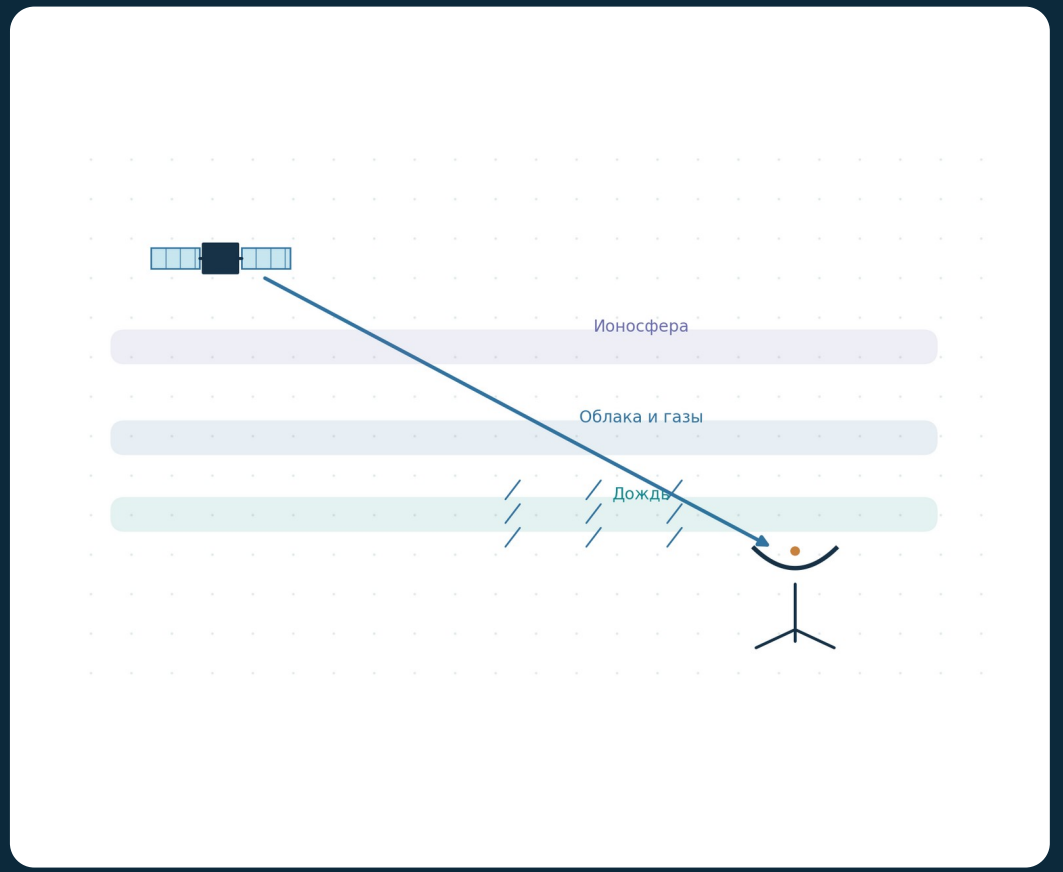
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 08

Влияние атмосферы на спутниковую связь

Газы, дождь, облака, сцинтилляции и инженерный запас



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Понять механизмы атмосферного ослабления и методы оценки доступности радиолинии.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Назвать основные механизмы атмосферных потерь. Объяснять роль угла места и частоты. Описывать меры компенсации замираний.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Поглощение газами**
2. **Дождь и гидрометеоры**
3. **Сцинтилляции и деполяризация**
4. **Статистический характер прогноза**
5. **Методы повышения устойчивости**
6. **Проектная процедура**

Поглощение газами

РАЗДЕЛ 1 / 6

Кислород и водяной пар поглощают энергию электромагнитной волны в определённых частотных областях. Величина ослабления зависит от частоты, профилей температуры, давления и влажности и длины атмосферного пути. Для инженерных оценок используют модель ITU-R P.676. В спутниковой линии малый угол места увеличивает путь сигнала через атмосферу, поэтому даже при той же высоте спутника поглощение может изменяться в пределах сеанса.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Поглощение газами

P.618

P.676

01

Дождь и гидрометеоры

РАЗДЕЛ 2 / 6

Капли дождя рассеивают и поглощают микроволновое излучение. На высоких частотах влияние осадков может стать определяющим фактором доступности. Для отдельного участка вводят удельное ослабление γ_R = kR^α, где R — интенсивность дождя, а коэффициенты зависят от частоты и поляризации. Однако переход от местной интенсивности дождя к распределению потерь всей спутниковой линии требует статистической модели, например ITU-R P.618.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

гидрометеоры

P.676

P.838

02

Сцинтилляции и деполяризация

РАЗДЕЛ 3 / 6

Неоднородности тропосферы вызывают быстрые флуктуации амплитуды и фазы сигнала. Осадки и ледяные частицы могут менять поляризационные характеристики линии. При проектировании важно различать средний уровень сигнала, кратковременные провалы и процент времени, в течение которого качество хуже требуемого. Расчёт доступности всегда связан с заданным климатом конкретного места.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Сцинтилляции

деполяризация

P.838

03

Статистический характер прогноза

РАЗДЕЛ 4 / 6

Указать, что потери «составляют 5 дБ», недостаточно без частоты, региона, угла места и процента времени. Проектные требования формулируют, например, через допустимую долю времени отказа. Оценка на основе среднемесячного дождя не заменяет статистические методы ITU-R.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Статистический характер прогноза

Дождевое затухание

Сцинтилляции

04

Методы повышения устойчивости

РАЗДЕЛ 5 / 6

Адаптивное кодирование и модуляция, управление мощностью, резервирование частоты, запас по энергетике и географическое разнообразие наземных станций помогают снижать влияние осадков. Нельзя бесконечно наращивать мощность: ограничения накладывают энергетика, нелинейность усилителя и разрешённые уровни излучения.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Методы повышения устойчивости

Сцинтилляции

Доступность

05

Проектная процедура

РАЗДЕЛ 6 / 6

Сначала рассчитывают потери свободного пространства и геометрию. Затем добавляют газовое поглощение, дождевое ослабление, облачность, сцинтилляции, деполяризацию и погрешности наведения. Для каждого эффекта выбирают корректную модель и диапазон её применимости, после чего рассчитывают суммарную доступность.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Проектная процедура

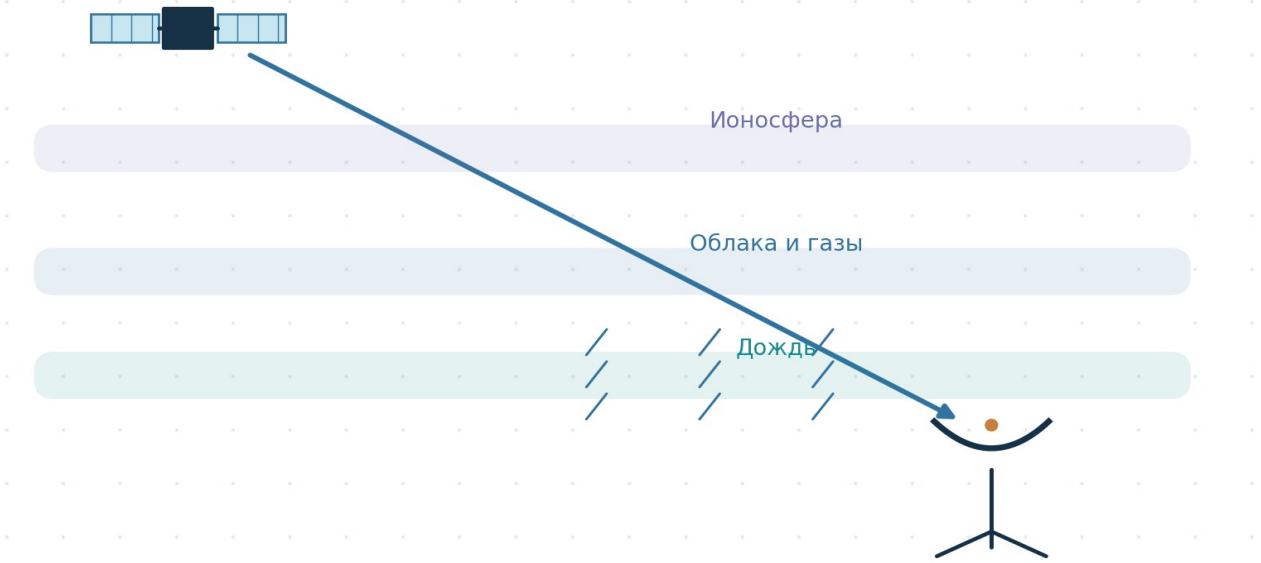
Доступность

Угол места

06

Техническая иллюстрация

Влияние атмосферы на спутниковую связь



Обратите внимание

Газы, дождь, облака, сцинтилляции и инженерный запас

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$\gamma_R = kR^{\alpha}\ [\text{дБ/км}];\ A_{\text{дождь}} \approx \gamma_R \times L_{\text{эфф}}$$

(иллюстративное приближение).

Обратите внимание

Указать, что потери «составляют 5 дБ», недостаточно без частоты, региона, угла места и процента времени.

Как меняется запас

Инженерный пример

Предположим, бюджет линии в ясную погоду имеет запас 8 дБ. Если во время ливня дополнительное ослабление достигло 10 дБ, остаточный запас равен −2 дБ: выбранный режим перестаёт удовлетворять требованию. Возможны временное снижение скорости и переход на более устойчивое кодирование. Конкретную вероятность такого события определяют по статистической модели.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Модели атмосферных потерь требуют заданного процента времени, а не только средней интенсивности дождя. Для заданной точки Земли выбирают климатические данные, параметры спутниковой линии, рабочую частоту, поляризацию и угол места. Методика ITU-R P.618 объединяет несколько видов ослабления с оговорёнными диапазонами применимости. Эффекты нельзя просто всегда складывать как независимые максимумы: это может привести к некорректной оценке доступности. При проектировании высокочастотной линии полезно сравнивать варианты «запас мощности», «снижение спектральной эффективности», «пространственное резервирование станций» и «адаптивное управление». Итог оценивают по доле времени, когда полезные данные реально достигают приёмника.

Алгоритм инженерной проверки

Последовательность действий



1. Определите исходные параметры и единицы.
2. Отделите измеренные значения от допущений и ориентировочных данных.
3. Проверьте расчёт и его применимость.
4. Оцените порядок величины, допущения и способ независимой проверки.

Последовательность проверки помогает связать расчёт, измерение и требования проекта.

Проектные ограничения

Что следует учитывать при реализации

Для профессионального расчёта нельзя использовать одну «типовую величину потерь на дождь» для всех регионов. Сравнение станции в засушливом районе и в тропиках требует отдельных климатических параметров и одинакового критерия доступности.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Представьте систему с запасом 6 дБ. Составьте сценарную таблицу для дополнительных потерь 0, 3, 6 и 9 дБ и опишите решение по режиму связи.

Термины для повторения

P.618 • P.676 • P.838 • Дождевое затухание • Сцинтилляции • Доступность • Угол места • ACM

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Что поглощает сигнал в атмосфере?

02 Почему дождь особенно важен на высоких частотах?

03 Зачем нужен критерий процента времени?

04 Как влияет угол места?

05 Что такое сцинтилляции?

06 Какие методы повышения устойчивости применяют?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Кислород и водяной пар поглощают энергию электромагнитной волны в определённых частотных областях.
2. Капли дождя рассеивают и поглощают микроволновое излучение.
3. Неоднородности тропосферы вызывают быстрые флуктуации амплитуды и фазы сигнала.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 ITU-R P.618-14 (2023). Earth-space propagation

02 ITU-R P.676-13 (2022). Atmospheric gases

03 ITU-R P.838-3. Rain attenuation

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан