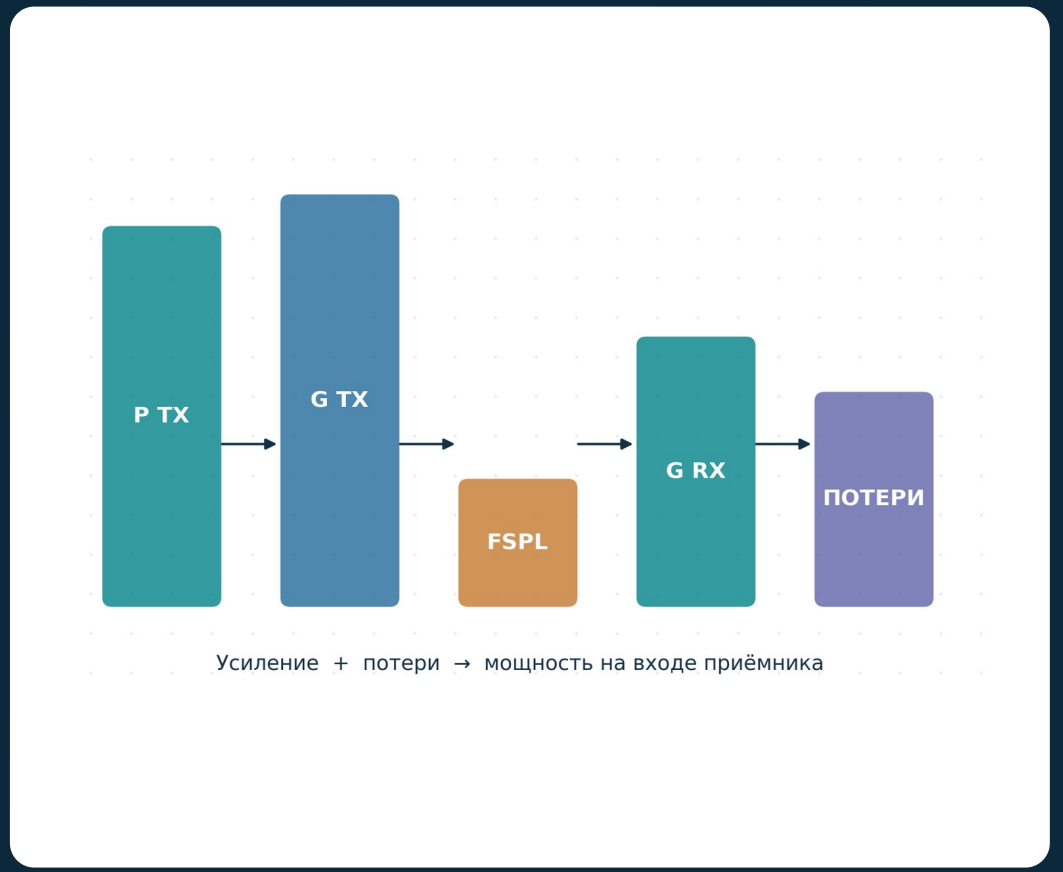
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 05

Энергетический баланс спутникового радиоканала

EIRP, FSPL, G/T, C/N_0, Eb/N_0 и запас линии



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Научиться собирать бюджет линии из мощностей, усилений, потерь и требуемого качества приёмного сигнала.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Вычислять потери свободного пространства. Связывать EIRP, G/T и C/N_0. Рассчитывать примерный запас радиолинии.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Логарифмическая система единиц**
2. **Ослабление на пути сигнала**
3. **Шум и качество радиоканала**
4. **Алгоритм расчёта**
5. **Тепловой шум**
6. **Запас и неопределённость**

Логарифмическая система единиц

РАЗДЕЛ 1 / 6

Мощности радиочастотного тракта часто выражают в дБВт или дБм, усиления — в дБи, а потери — в дБ. Такая форма переводит произведения в суммы. Важно не складывать линейную мощность в ваттах непосредственно с коэффициентом усиления в децибелах. EIRP — эквивалентная изотропно излучаемая мощность: в дБВт она равна мощности передатчика плюс усиление антенны минус потери передающего тракта.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Логарифмическая система единиц

EIRP

FSPL

01

Ослабление на пути сигнала

РАЗДЕЛ 2 / 6

В свободном пространстве сигнал расходится, и плотность потока мощности убывает с квадратом дальности. Формула FSPL = $20\log_{10}(4\pi R/\lambda)$ показывает, что потери в децибелах растут при увеличении дальности и частоты для одинаковых коэффициентов усиления антенн. К расчётным потерям добавляют атмосферное поглощение, поляризационное несоответствие, ошибки наведения и потери в фидерах.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Ослабление на пути сигнала

FSPL

G/T

02

Шум и качество радиоканала

РАЗДЕЛ 3 / 6

Приёмную способность описывают коэффициентом G/T: усиление антенны относительно системной шумовой температуры. Отношение C/N_0 измеряется в дБГц и связывает мощность несущей с плотностью шумовой мощности. Для цифровой связи удобно использовать Eb/N_0, поскольку его порог зависит от модуляции, кодирования и целевой вероятности ошибки. Запас линии сравнивает фактически доступное отношение с необходимым.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

качество радиоканала

G/T

C/N_0

03

Алгоритм расчёта

РАЗДЕЛ 4 / 6

Выпишите частоту, наклонную дальность и потери FSPL. Далее задайте EIRP передатчика, усиление и шумовую температуру приёмной станции, дополнительные потери и битовую скорость. Все величины приводите к согласованным единицам. Сначала проверяйте наиболее неблагоприятную геометрию и погоду, затем типичный режим.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Алгоритм расчёта

C/N_o

Eb/N_o

04

Тепловой шум

РАЗДЕЛ 5 / 6

Для полосы B шумовая мощность N = kTB, где k — постоянная Больцмана, T — температура шума, B — полоса. При заданном C/N_0 отношение Eb/N_0 получается вычитанием $10\log_{10}(R_b)$, если R_b — скорость информационных бит в бит/с и все используемые величины согласованы.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Тепловой шум

Eb/N_0

дБВт

05

Запас и неопределённость

РАЗДЕЛ 6 / 6

Проектный запас покрывает погрешности моделирования, старение оборудования и изменчивость условий. Однако завышенный запас приводит к лишней массе, мощности и стоимости. В инженерном отчёте полезно показывать чувствительность запаса к дальности, углу места и ошибке наведения.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

неопределённость

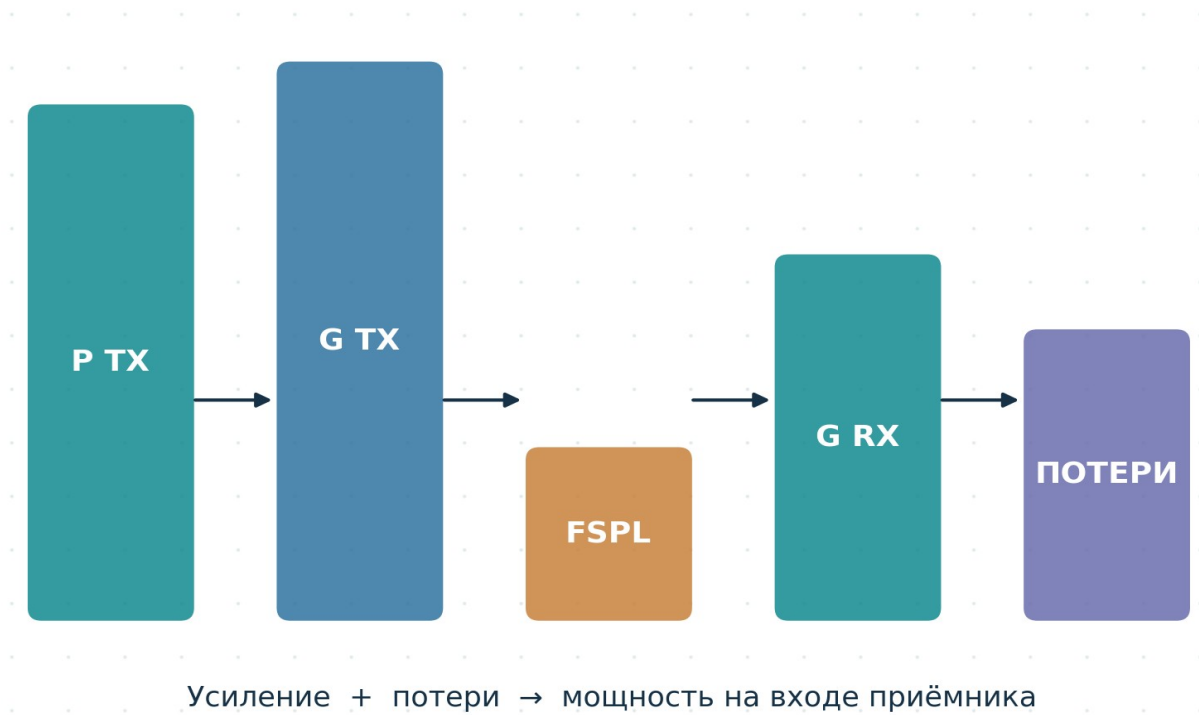
дБВт

дБи

06

Техническая иллюстрация

Энергетический баланс спутникового радиоканала



Обратите внимание

EIRP, FSPL, G/T, C/N_0, Eb/N_0 и запас линии

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$FSPL[dB] = 92{,}45 + 20\log_{10}(f[ГГц]) + 20\log_{10}(R[км]);$$
$$Eb/N_0 = C/N_0 - 10\log_{10}(R_b).$$

Обратите внимание

Выпишите частоту, наклонную дальность и потери FSPL.

Потери при 2,2 ГГц и 1000 км

Инженерный пример

FSPL = 92,45 + 20log₁₀(2,2) + 20log₁₀(1000) ≈ 159,3 дБ. Если EIRP = 15 дБВт, усиление приёмной антенны = 25 дБи и дополнительные потери = 3 дБ, мощность несущей на входе приёмника составит 15 + 25 − 159,3 − 3 ≈ −122,3 дБВт. Для окончательного вывода необходимо вычислить шум и сравнить E_b/N_0 с порогом приёмника.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Расчёт линии проводите как бухгалтерию мощности: у каждой строки должна быть физическая причина и единица. Сначала определите геометрические и фидерные потери, потом добавьте характеристику приёмной системы. Заменять суммарный шум одной произвольной величиной недопустимо: шумовая температура антенны зависит от того, куда она направлена, а LNA и последующие каскады добавляют собственный шум. Отдельно сравнивают чистый энергетический запас и эксплуатационный запас с поправкой на погоду, наведение и деградацию компонентов. Полезный приём — пересчитать линию для двух точек пролёта: близкого зенитного и дальнего низкого угла места.

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

В отчётах всегда приводите единицы и допущения. Нельзя сравнивать C/N и Eb/N_o без знания полосы и битовой скорости; нельзя заменять высоту орбиты наклонной дальностью без учёта геометрии. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Вычислите FSPL при 437 МГц, дальности 700 и 1800 км. Сравните результаты и объясните влияние геометрии пролёта.

Термины для повторения

EIRP • FSPL • G/T • C/N_0 • Eb/N_0 • дБВт • дБи • Запас линии

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Что означает EIRP?

02 Как изменится FSPL при удвоении дальности?

03 В чём смысл G/T?

04 Как связаны C/N_0 и Eb/N_0?

05 Почему нужен запас по энергетике?

06 Какие потери добавляются к FSPL?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Мощности радиочастотного тракта часто выражают в дБВт или дБм, усиления — в дБи, а потери — в дБ.

2. В свободном пространстве сигнал расходится, и плотность потока мощности убывает с квадратом дальности.

3. Приёмную способность описывают коэффициентом G/T: усиление антенны относительно системной шумовой температуры.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

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

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан