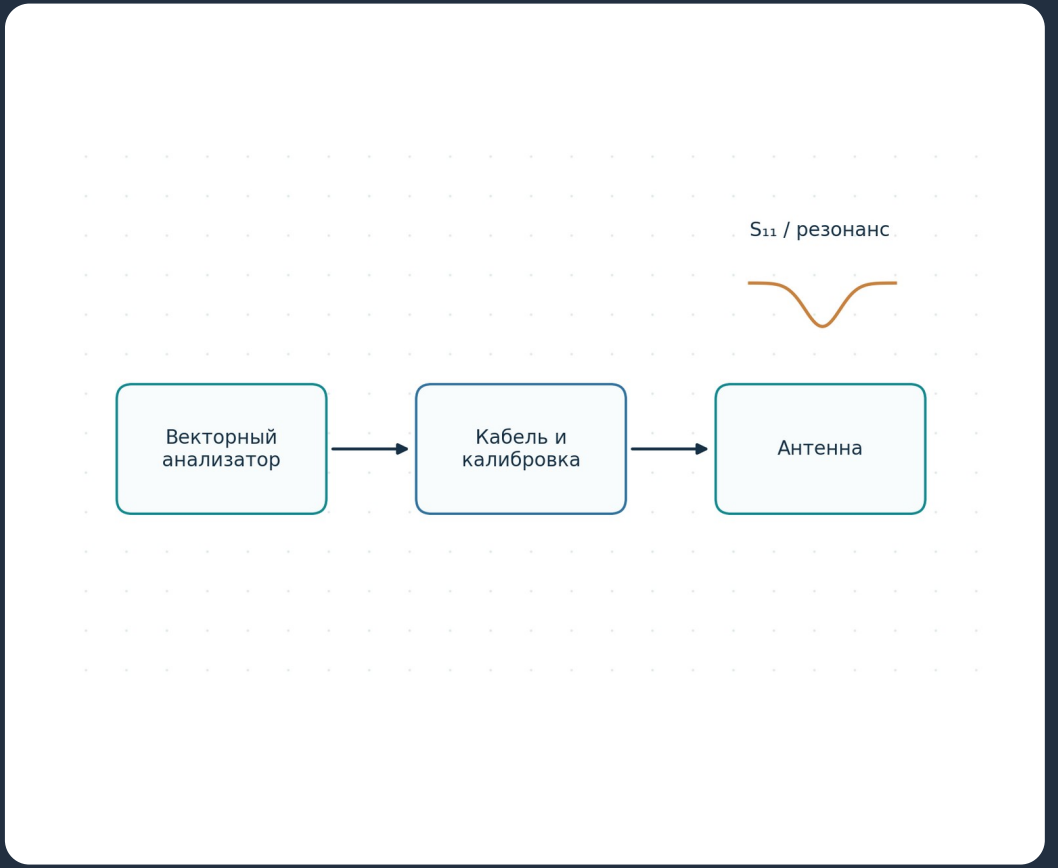
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 09

Фидерные тракты, согласование и измерение антенн

S-параметры, КСВН, потери, VNA и измерительные ошибки



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Объяснить, как корректно подключить антенну к радиосистеме и подтвердить её характеристики измерениями.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Рассчитывать Г и КСВН. Читать график S11. Составить базовую методику измерения антенны.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Входное сопротивление и отражение**
2. **Коаксиальные линии и соединители**
3. **Векторный анализатор цепей**
4. **КСВН и возвратные потери**
5. **Измерение диаграммы**
6. **Документирование**

Входное сопротивление и отражение

РАЗДЕЛ 1 / 6

На входе антенны существует комплексный импеданс Z_A = R + jX. Если он не совпадает с волновым сопротивлением линии Z_0, часть падающей волны отражается. Коэффициент отражения Г = (Z_A − Z_0)/(Z_A + Z_0) определяет относительную амплитуду отражённой волны. S11 по модулю часто выражают в дБ; чем более отрицательно значение, тем меньше отражённая мощность. При этом хорошее согласование не даёт информации о форме диаграммы.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Входное сопротивление

отражение

Импеданс

01

Коаксиальные линии и соединители

РАЗДЕЛ 2 / 6

Кабель вносит частотозависимые потери, изменяет фазу и может быть источником паразитных излучений при плохом экранировании или монтаже. В тракте важно использовать согласованные по импедансу компоненты, соблюдать допустимую мощность и радиус изгиба. Переходы и разъёмы могут существенно влиять на измерение СВЧ антенны, поэтому их не следует исключать из инженерной модели без основания.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Коаксиальные линии

соединители

Г

02

Векторный анализатор цепей

РАЗДЕЛ 3 / 6

VNA измеряет комплексные S-параметры, включая амплитуду и фазу отражения. Перед измерением выполняют калибровку и корректируют опорную плоскость измерения: некомпенсированный кабель может замаскировать реальную частотную зависимость. Типовые методы калибровки включают SOLT и TRL. Для интерпретации результатов сохраняют частотный диапазон, калибровочный набор и условия установки образца.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Векторный анализатор цепей

S11

КСВН

03

КСВН и возвратные потери

РАЗДЕЛ 4 / 6

Для $|Г| < 1$ коэффициент стоячей волны КСВН = $(1 + |Г|)/(1 - |Г|)$. При S11 = −10 дБ $|Г| \approx 0{,}316$, что соответствует около 10% отражённой мощности и КСВН ≈ 1,92. Это широко используемый ориентир по согласованию, но допустимый порог должен определяться конкретной системой.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

возвратные потери

КСВН

VNA

04

Измерение диаграммы

РАЗДЕЛ 5 / 6

Для оценки усиления и диаграммы используют безэховую камеру или правильно организованный полигон, известную эталонную антенну и контролируемую поляризацию. Радиус измерения выбирают с учётом дальней зоны обеих антенн. Особое внимание уделяют паразитным отражениям и положению питающего кабеля.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Измерение диаграммы

VNA

SOLT

05

Документирование

РАЗДЕЛ 6 / 6

Протокол должен содержать чертёж образца, материалы, фото монтажа, серийный номер, частотные настройки, калибровку и результаты S11, усиления, диаграмм и, при необходимости, AR. Только повторяемая процедура позволяет корректно сравнивать версии антенн.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Документирование

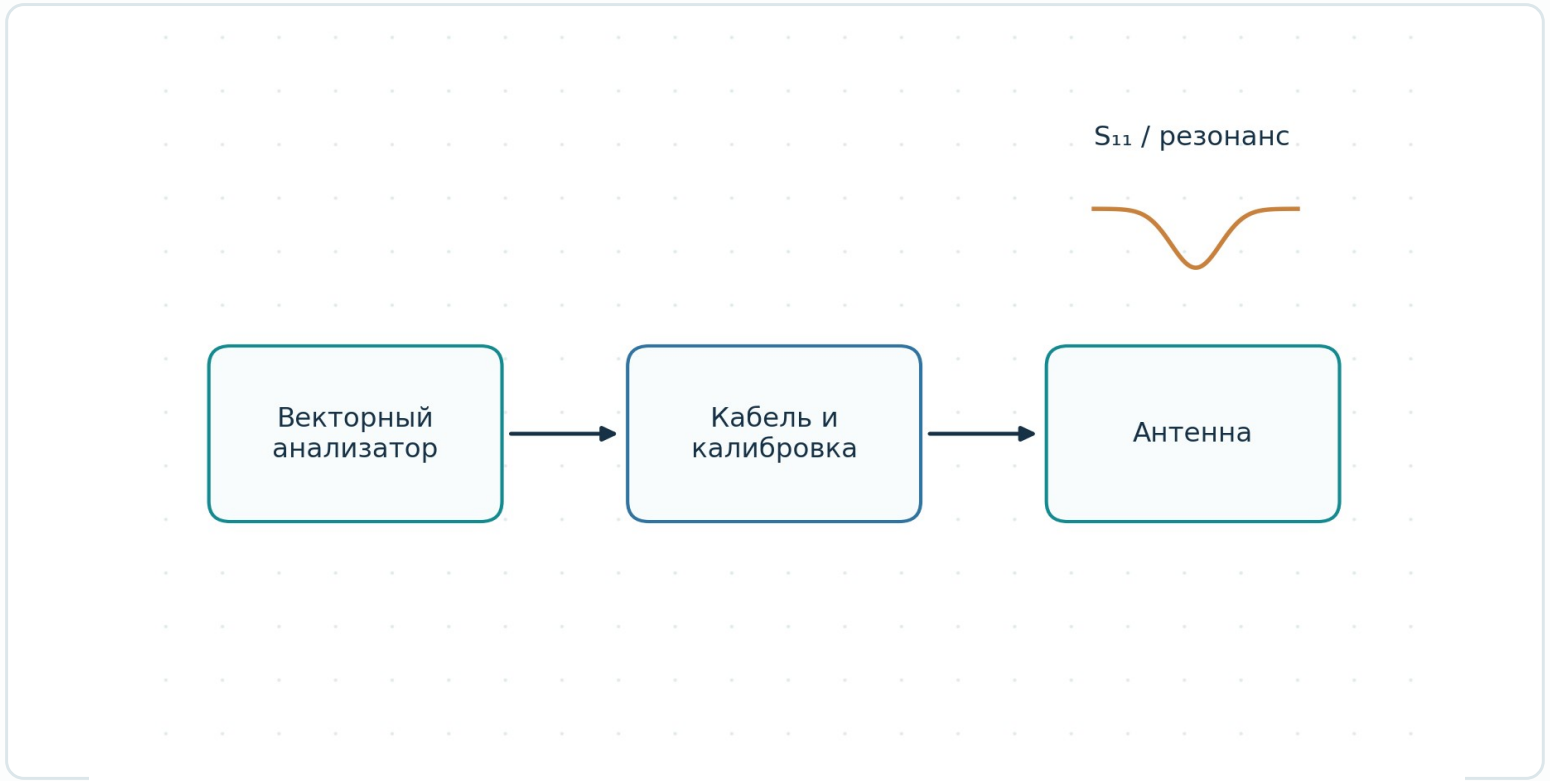
SOLT

TRL

06

Техническая иллюстрация

Фидерные тракты, согласование и измерение антенн



Обратите внимание

S-параметры, КСВН, потери, VNA и измерительные ошибки

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$\Gamma = (Z_A - Z_0)/(Z_A + Z_0);\ S11[dB] = 20\log_{10}|\Gamma|;\ КСВН = (1+|\Gamma|)/(1-|\Gamma|).$$

Обратите внимание

Для $|\Gamma| < 1$ коэффициент стоячей волны КСВН = $(1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$.

S11 = −15 дБ

Инженерный пример

При S11 = −15 дБ имеем |Г| = 10^(−15/20) ≈ 0,178. Отражается доля мощности |Г|² ≈ 0,0316, то есть 3,16%. КСВН ≈ 1,43. Остальная принятая антенной мощность не обязательно полностью излучается: часть может теряться в материалах.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Испытание антенны следует рассматривать как цепочку контрольных плоскостей: порт VNA, переходник, кабель, разъём образца и собственно входная структура антенны. Калибровка переносит плоскость отсчёта и исключает часть систематических ошибок, но не устраняет механическую нестабильность соединителя или паразитные токи фидера. При измерении диаграммы появляется дополнительная задача: контролировать пространственные отражения и поляризацию эталонной антенны. При сравнении рассчитанной и измеренной кривых полезно проверять не только совпадение минимума S11, но и ширину полосы и изменения от переподключения.

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

На высоких частотах калибровка, качество переходника и прикосновение к фидерному кабелю могут заметно менять S11. Если измерения моделей не совпадают, сначала проверяют опорную плоскость, повторяемость монтажа и характеристики кабеля. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Для S11 = −6, −10, −15 и −20 дБ рассчитайте |Г|, отражённую мощность и КСВН. Оформите таблицу.

Термины для повторения

Импеданс • Г • S11 • КСВН • VNA • SOLT • TRL • Безэховая камера

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Что такое Z_A?

02 Чем S11 отличается от коэффициента усиления?

03 Как вычислить КСВН?

04 Для чего выполняют калибровку VNA?

05 Почему необходима дальняя зона?

06 Что включают в протокол измерений?

Итоги лекции

Три основных положения

1. На входе антенны существует комплексный импеданс $Z_A = R + jX$.

2. Кабель вносит частотозависимые потери, изменяет фазу и может быть источником паразитных излучений при плохом экранировании или монтаже.

3. VNA измеряет комплексные S-параметры, включая амплитуду и фазу отражения.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 C. A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design (учебник)

02 J. D. Kraus, R. J. Marhefka. Antennas (учебник)

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

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан