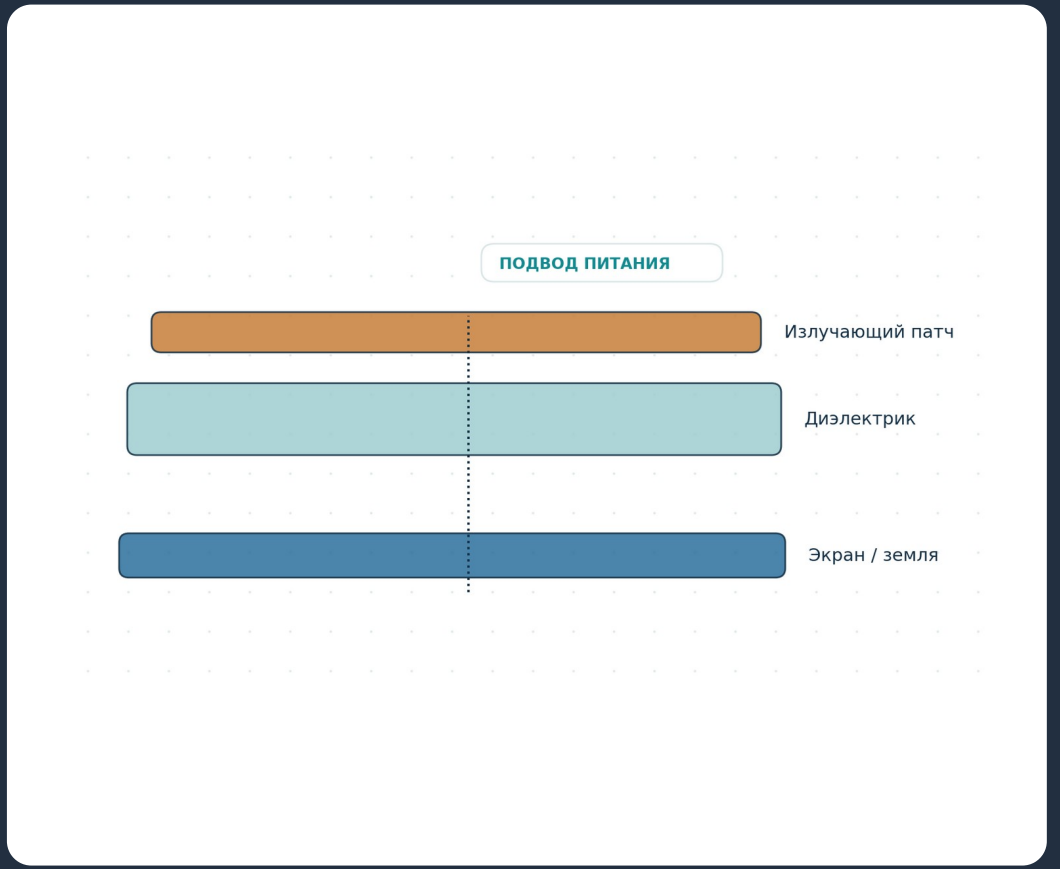
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 06

Микрополосковые и печатные антенны

Patch-излучатели, подложки, питание и конструктивные компромиссы



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Освоить принципы проектирования печатных антенн для компактных радиосистем и космических платформ.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Описывать структуру patch-антенны. Объяснять роль εr и толщины подложки. Перечислять способы питания и проверки печатной конструкции.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Прямоугольный patch-излучатель**
2. **Подложка и её параметры**
3. **Способы питания**
4. **Начальный инженерный расчёт**
5. **Точность изготовления**
6. **Проверка характеристик**

Прямоугольный patch-излучатель

РАЗДЕЛ 1 / 6

Классическая микрополосковая антенна имеет металлический излучающий элемент над заземлённой плоскостью, разделённый диэлектрической подложкой. При возбуждении вблизи резонанса по краям формируются поля рассеяния, создающие излучение. Начальные габариты определяются длиной волны внутри эффективной диэлектрической среды, а точные значения зависят от конечных размеров земли, толщины металла и способа питания.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Прямоугольный patch-излучатель

Patch

Подложка

01

Подложка и её параметры

РАЗДЕЛ 2 / 6

Относительная диэлектрическая проницаемость εr влияет на фазовую скорость и размеры структуры. Подложка с большей εr позволяет уменьшить размеры, но может снизить полосу и эффективность. Увеличение толщины иногда расширяет полосу, но способно увеличить поверхностные волны и паразитные эффекты. Для СВЧ важно учитывать тангенс угла диэлектрических потерь, допуски производства и частотную зависимость материала.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Подложка

её параметры

εr

02

Способы питания

РАЗДЕЛ 3 / 6

Patch может питаться микрополосковой линией, коаксиальным зондом, через щель или электромагнитной связью. Место питания влияет на входное сопротивление и согласование. Для круговой поляризации используют специальные формы, возмущения геометрии либо два ортогональных возбуждения со сдвигом фаз. При проектировании необходимо рассчитать не только S11, но и усиление, диаграмму и осевое отношение.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Способы питания

εr

tanδ

03

Начальный инженерный расчёт

РАЗДЕЛ 4 / 6

Для простого прямоугольного patch ширину часто оценивают W ≈ c/[2f√((εr + 1)/2)]. Длину определяют с учётом эффективной проницаемости и краевого удлинения. Аналитическая оценка задаёт стартовые размеры для полноволновой оптимизации, а не финальный чертёж.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Начальный инженерный расчёт

tanδ

Микрополосковая линия

04

Точность изготовления

РАЗДЕЛ 5 / 6

На частотах нескольких гигагерц даже небольшое отклонение размеров, толщины подложки или положения разъёма способно сдвинуть резонанс. Требуется фиксировать стек платы, медь, паяльную маску, допуски и конструкцию перехода к коаксиальному кабелю.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Точность изготовления

Микрополосковая линия

S11

05

Проверка характеристик

РАЗДЕЛ 6 / 6

После моделирования изготавливают контрольный образец, калибруют векторный анализатор цепей и измеряют S11. Затем проверяют диаграмму, усиление и поляризацию в подходящих условиях. Монтаж на корпус и соседние проводящие детали учитывают в финальной электромагнитной модели.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Проверка характеристик

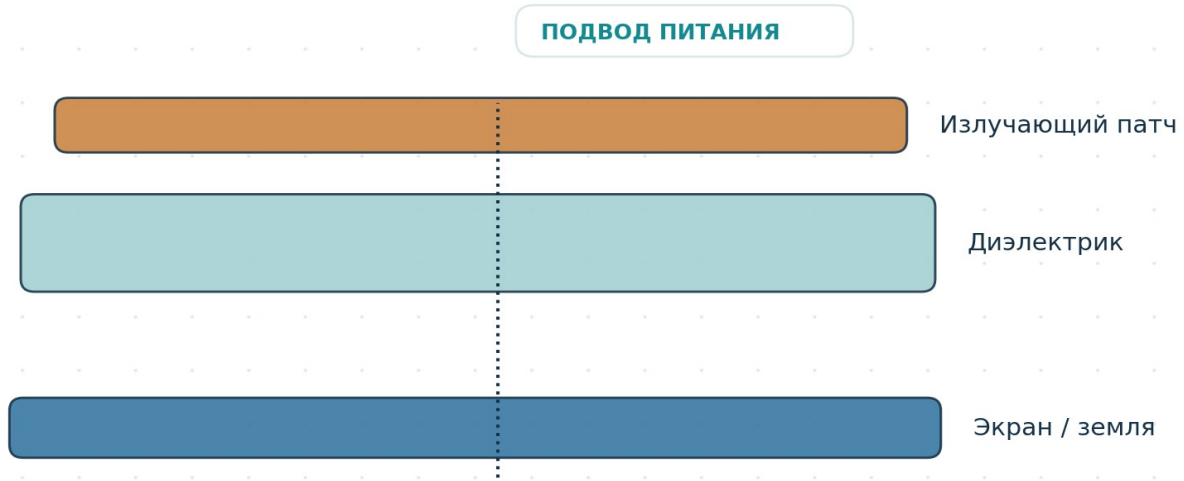
S11

Земля

06

Техническая иллюстрация

Микрополосковые и печатные антенны



Обратите внимание

Patch-излучатели, подложки, питание и конструктивные компромиссы

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$W \approx c / [2f\sqrt{((\varepsilon r + 1)/2)}]$$ (стартовая оценка ширины patch).

Обратите внимание

Для простого прямоугольного patch ширину часто оценивают $W \approx c/[2f\sqrt{((\varepsilon r + 1)/2)}]$.

Начальная ширина на 2,4 ГГц

Инженерный пример

Пусть $\varepsilon_r = 2{,}2$. Тогда $W \approx 3\times10^8/[2\times2{,}4\times10^9\times\sqrt{1{,}6}] \approx 49{,}4$ мм. Это только первое приближение ширины; длину резонансного элемента рассчитывают отдельно, а частоту уточняют на полной модели с фидером и корпусом.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Полноволновая модель печатной антенны должна включать реальные размеры заземлённой плоскости и порт возбуждения. Подстановка средней εr в формулу полезна для первоначального эскиза, но недостаточна, если подложка имеет неоднородности, дисперсию или выраженные потери. На СВЧ частотах заметны погрешности травления, толщина меди, переход на коаксиальный разъём и размеры контактных площадок. Два изделия с одинаковым S11 могут иметь различный КПД и поляризацию. Для круговой поляризации требуются оценка AR и согласование амплитудно-фазового баланса, а не только смещение резонансной частоты.

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

Хороший S11 не доказывает хорошее излучение. Антенна может эффективно принимать мощность от порта, но рассеивать её в диэлектрические потери или паразитные моды. Поэтому полный паспорт должен включать эффективность, усиление и диаграмму. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Вычислите начальную ширину patch на 8,4 ГГц при εr = 2,2 и 4,4; объясните компромиссы по размерам и потерям.

Термины для повторения

Patch • Подложка • εr • tanδ • Микрополосковая линия • S11 • Земля • Осевое отношение

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Из каких слоёв состоит patch?

02 Как εr влияет на размер?

03 Почему нужна полноволновая оптимизация?

04 Какие существуют способы питания?

05 Что, кроме S11, надо измерять?

06 Как влияет конечная плоскость земли?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Классическая микрополосковая антенна имеет металлический излучающий элемент над заземлённой плоскостью, разделённый диэлектрической подложкой.

2. Относительная диэлектрическая проницаемость εr влияет на фазовую скорость и размеры структуры.

3. Patch может питаться микрополосковой линией, коаксиальным зондом, через щель или электромагнитной связью.

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