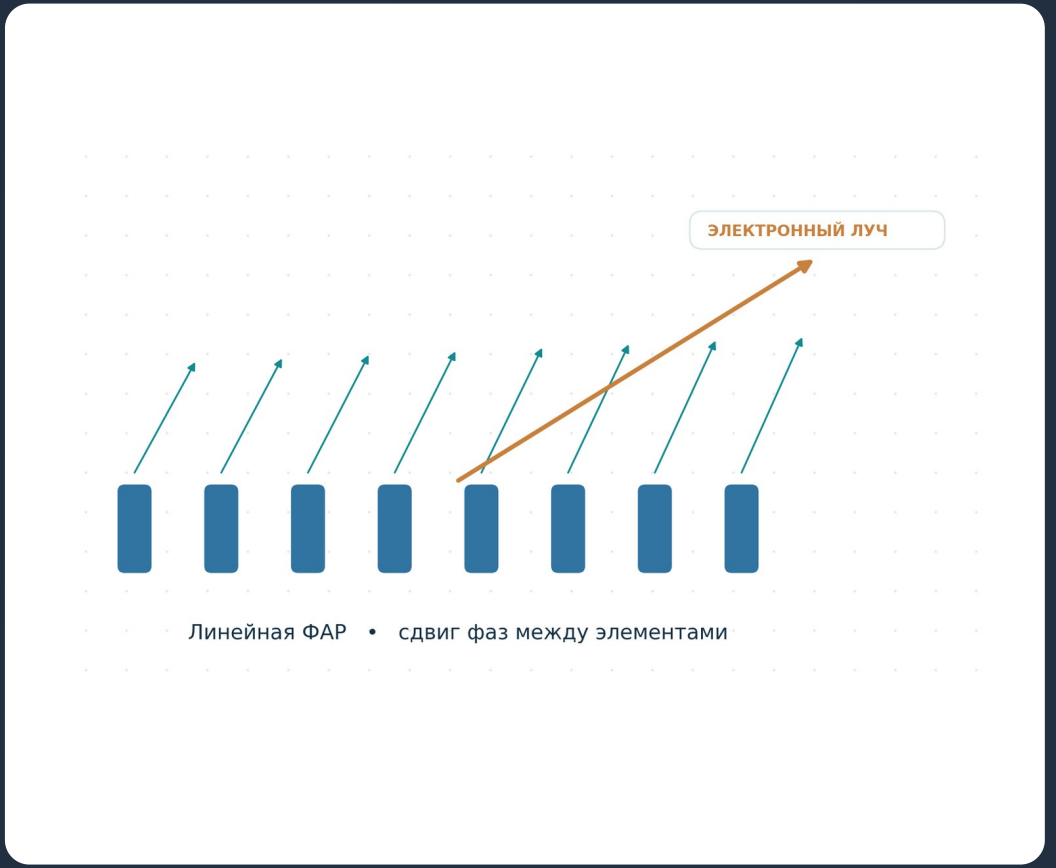
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 07

Антенные решётки и фазированное управление лучом

Линейные и плоские решётки, коэффициент решётки и сканирование



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Понять, как совместное возбуждение нескольких элементов формирует управляемую пространственную диаграмму.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Объяснять фазовый принцип наведения. Оценивать опасность решёточных лепестков. Различать электронное и механическое сканирование.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Суммирование полей элементов**
2. **Шаг элементов и решёточные лепестки**
3. **Амплитудное распределение и боковые лепестки**
4. **Фазовый сдвиг**
5. **Взаимная связь**
6. **Архитектура управления**

Суммирование полей элементов

РАЗДЕЛ 1 / 6

Антенная решётка объединяет несколько излучателей с заданными амплитудами и фазами возбуждения. В дальней зоне их поля складываются с учётом разности фаз из-за пространственного положения. Диаграмма всей системы приближённо представляется произведением диаграммы элемента и коэффициента решётки для одинаковых элементов при соблюдении модельных допущений. Изменением относительных фаз можно смещать главный лепесток без физического поворота антенны.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Суммирование полей элементов

ФАР

Коэффициент решётки

01

Шаг элементов и решёточные лепестки

РАЗДЕЛ 2 / 6

Если расстояние между элементами слишком велико относительно длины волны, при сканировании появляются дополнительные максимумы — решёточные лепестки, которые ухудшают селективность по направлениям. Шаг около λ/2 часто выбирают как удобный начальный компромисс для широкого углового сканирования, но окончательное требование зависит от диапазона углов и геометрии решётки. Важны также взаимное влияние элементов и конечная апертура.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Шаг элементов

решёточные лепестки

Коэффициент решётки

02

Амплитудное распределение и боковые лепестки

РАЗДЕЛ 3 / 6

Равномерное возбуждение даёт эффективное использование апертуры, но относительно выраженные боковые лепестки. Применение распределений с уменьшенной амплитудой у краёв снижает боковые лепестки ценой расширения главного и уменьшения пикового усиления. В активной решётке каждый канал может включать усилитель, фазовращатель и средства калибровки, что повышает сложность питания и терморегулирования.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Амплитудное распределение

боковые лепестки

Фазовращатель

03

Фазовый сдвиг

РАЗДЕЛ 4 / 6

Для соседних элементов линейной решётки с шагом d требуемый фазовый прирост для сканирования на угол θ_0 от нормали: $\Delta\varphi \approx -(2\pi d/\lambda)\sin\theta_0$. Знак зависит от принятой системы координат и порядка нумерации элементов.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Фазовый сдвиг

d/λ

Сканирование

04

Взаимная связь

РАЗДЕЛ 5 / 6

Близко расположенные излучатели электромагнитно связаны. Это может менять активные входные сопротивления и диаграммы элементов при сканировании. Верификация решётки требует проверки нескольких углов и частот, а не только центральной точки и статического режима.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Взаимная связь

Сканирование

Решёточный лепесток

05

Архитектура управления

РАЗДЕЛ 6 / 6

В цифровой решётке обработка сигналов может выполнять формирование луча на уровне цифровых отсчётов; в аналоговой — фазовращателями и линиями задержки. Гибридная структура сочетает подходы. Проектирование зависит от числа каналов, полосы, энергопотребления и необходимого числа независимых лучей.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Архитектура управления

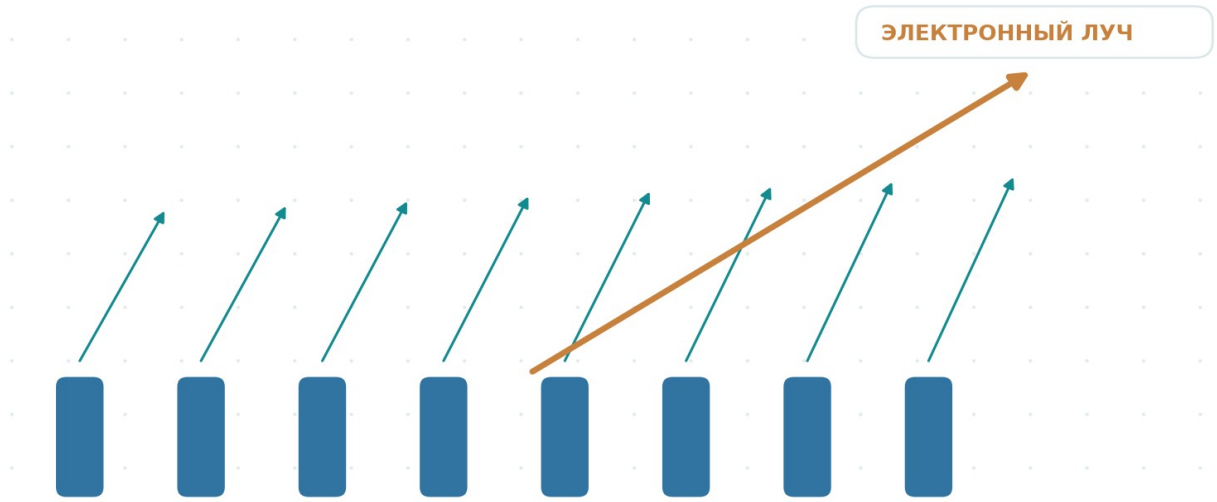
Решёточный лепесток

Калибровка

06

Техническая иллюстрация

Антенные решётки и фазированное управление лучом



Обратите внимание

Линейные и плоские решётки, коэффициент решётки и сканирование

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$\Delta\varphi \approx -(2\pi d/\lambda)\sin\theta_0$; $d \lesssim \lambda/2$ — типичный старт для широкого сканирования.

Обратите внимание

Для соседних элементов линейной решётки с шагом d требуемый фазовый прирост для сканирования на угол θ_0 от нормали: $\Delta\varphi \approx -(2\pi d/\lambda)\sin\theta_0$.

Фазирование на угол 30°

Инженерный пример

Для $d = \lambda/2$ и $\theta_0 = 30°$ модуль фазового сдвига между соседними элементами: $|\Delta\varphi| = (2\pi \times 0{,}5) \times 0{,}5 = \pi/2 = 90°$. Если фазовые сдвиги заданы правильно, главный максимум смещается относительно нормали к плоскости решётки.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Сканирование решётки формируется разностью фаз по элементам, но практически оно связано с частотной зависимостью, распределением амплитуд и взаимной связью. При широкой полосе постоянный фазовый сдвиг не эквивалентен истинной задержке: направление луча может меняться с частотой. Это явление называют beam squint. Кроме того, при смещении луча от нормали эффективная апертура уменьшается, поэтому максимальное усиление в крайних направлениях может падать. Необходимо проверять характеристики на сетке углов и частот, включая боковые и решёточные лепестки, а не только в центральном направлении.

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

Электронное сканирование не устраняет требование к калибровке: фазовые и амплитудные ошибки, температурный дрейф и взаимная связь снижают усиление и увеличивают боковые лепестки. Калибровку включают в жизненный цикл системы. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Рассчитайте фазовый сдвиг для линейной решётки d = λ/2 при углах 0°, 15°, 30° и 45°. Представьте значения таблицей.

Термины для повторения

ФАР • Коэффициент решётки • Фазовращатель • d/λ • Сканирование • Решёточный лепесток • Калибровка • Взаимная связь

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Что такое коэффициент решётки?

02 Как фаза меняет направление луча?

03 Когда возникают решёточные лепестки?

04 Зачем применяют амплитудное взвешивание?

05 Что такое активное согласование?

06 Чем аналоговое формирование луча отличается от цифрового?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Антенная решётка объединяет несколько излучателей с заданными амплитудами и фазами возбуждения.

2. Если расстояние между элементами слишком велико относительно длины волны, при сканировании появляются дополнительные максимумы — решёточные лепестки, которые ухудшают селективность по направлениям.

3. Равномерное возбуждение даёт эффективное использование апертуры, но относительно выраженные боковые лепестки.

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