Электродинамика для пользователей САПР

С.Е. Банков

Краткая программа курса 1

1. Введение, актуальность курса, его цели и задачи.
2. Общая характеристика граничных задач ЭД: типы задач, среды, источники поля, поверхности, граничные условия.
3. Уравнения Максвелла и их следствия (интегральные соотношения электродинамики).
4. Среды: изотропные магнито-диэлектрики, анизотропные среды, гиротропные среды, металлы и их характеристики, модели сред.
5. Поверхности и граничные условия: стенки perfect E,H, импедансные граничные условия, стенки симметрии, RLC поверхности, поверхности излучения и т.д.
6. Источники поля: порты волновой и сосредоточенный, сторонние токи, падающее поле.

Краткая программа курса 2

7. Электродинамика СВЧ многополюсников: симметрия, взаимность, недиссипативность.
8. Излучение ЭМВ, поверхность излучения и идеально согласованный слой (PML), параметры антенн.
9. Строгие методы решения граничных задач ЭД: метод интегральных уравнений, метод конечных элементов, метод FDTD.
10. Асимптотические методы ЭД: методы геометрической и физической оптики, методы ГТД и ФТД. Гибридные методы ЭД.
11. Периодические структуры, теория Флоке, анализ бесконечных ФАР.
12. Особенности моделирования полосковых схем.
13. Применение режима eigenmode для анализа однородных и периодических линий передачи.

Зачем нужен курс?

1. В последние 30 лет системы электродинамического моделирования прочно вошли в практику разработки радиоэлектронных устройств.
2. Область применения волновых процессов существенно расширилась за счет развития систем связи, навигации, телевидения, работающих в СВЧ диапазоне.
3. Классические курсы Электродинамика, Антенны, СВЧ устройства не вполне адекватны современной практике разработки РЭА, т.к. в традиционном варианте они во многом ориентированы на методы решения задач и их математическую реализацию.
4. Все эти методы реализованы в современных системах электродинамического моделирования. Зачем их учить?
5. Даже простое прочтение пунктов интерфейса такой программы как HFSS показывает, что для ее эффективного использование необходимо знакомство со многими понятиями, выходящими за пределы стандартных курсов.
6. Если их осваивать детально, то не хватит жизни, а если не осваивать вовсе, то эффективность использования системы моделирования низкая.

Поэтому цель данного курса изучить предмет широко, но поверхностно. Курс можно рассматривать как справочник по базовым вопросам электродинамики, встречающимся при

Общая характеристика граничных задач электродинамики, методов их решения, объектов численной электродинамики

Уравнения Максвелла

Неоднородные уравнения

$$rot\vec{H} = i\omega\boldsymbol{\varepsilon}_a\vec{E} + \boldsymbol{\sigma}^e\vec{E} + \vec{j}^e$$

$$rot\vec{E} = -i\omega\boldsymbol{\mu}_a\vec{H} - \boldsymbol{\sigma}^m\vec{H} - \vec{j}^m$$

Однородные уравнения

$$rot\vec{H} = i\omega\boldsymbol{\varepsilon}_a\vec{E} + \boldsymbol{\sigma}^e\vec{E}$$

$$rot\vec{E} = -i\omega\boldsymbol{\mu}_a\vec{H} - \boldsymbol{\sigma}^m\vec{H}$$

E,H – векторы электрического и магнитного полей
ε,μ – тензоры диэлектрической магнитной проницаемостей среды
σ – тензоры электрической и магнитной проводимостей
$j^{e,m}$ – сторонние токи

Зависимость от времени взята в виде $\exp(i\omega t)$

Методы решения граничных задач и системы моделирования

1. Строгие численные методы и системы 3-х мерного моделирования:
   1.1. Метод конечных элементов – High Frequency System Simulator (HFSS)
   1.2. Метод Finite Difference Time Domain (FDTD) – CST Microwave Studio (CST MWS)
   1.3. Метод интегральных уравнений (ИУ) – FEKO.

2. Метод ИУ в системах 2.5 мерного моделирования
   2.1. Advanced Design System (ADS)
   2.2. Microwave Office (MWO)

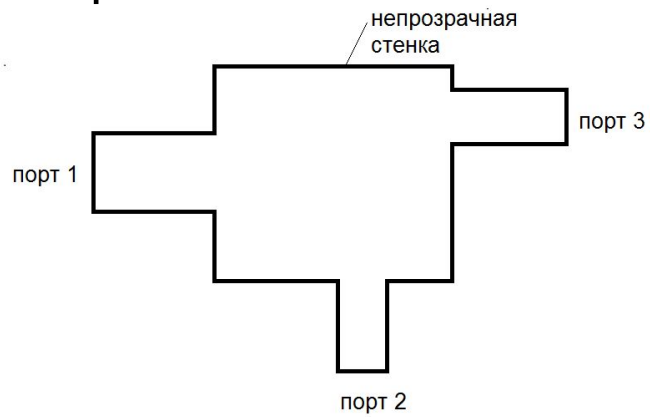
Элементарные структуры электродинамики

1. Конечные и бесконечные однородные магнито-диэлектрические среды
2. Идеально проводящая среда
3. Непрозрачные стенки: идеальные электрические и магнитные стенки, импедансные стенки
4. Виртуальные объекты: стенки симметрии, периодические поверхности
5. Источники поля: порты, сторонние токи, первичное поле

Внутренние задачи электродинамики

Закрытые структуры

Ограничены непрозрачными стенками и б.м. конечным числом портов



При наличии портов: задачи анализа закрытых СВЧ многополюсников

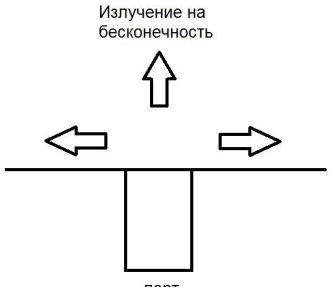
В отсутствие портов и других источников: задачи на собственные колебания закрытых резонаторов

Продольно однородные закрытые структуры – закрытые волноводы: Задачи на собственные волны закрытых волноводов

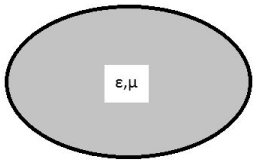
Внешние задачи электродинамики

Открытые структуры

Содержат бесконечные или полубесконечные среды, которые поглощают излученную энергию



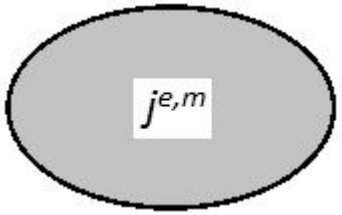
При наличии портов: задача анализа антенны
При отсутствии портов, при наличии сторонних токов: задачи излучения



В отсутствие источников и ограниченных объектов:
Задачи на собственные колебания открытых резонаторов

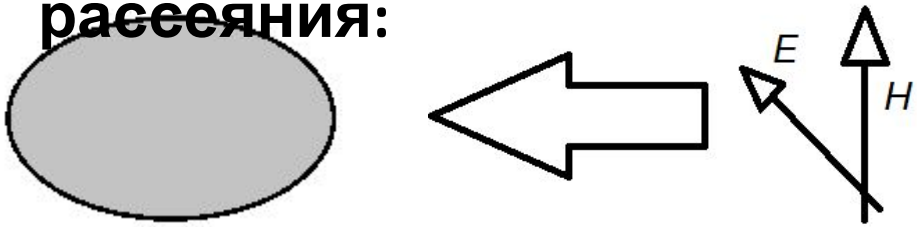
Продольно однородные открытые структуры – открытые волноводы:
Задачи на собственные волны открытых волноводов

Источники ЭМ поля



Сторонние токи – виртуальные источники

Задачи ~~рассеяния~~:



Внешнее поле, чаще всего плоская волна

Порты: волновые и сосредоточенные

Волновой порт – модель полубесконечного волновода

Сосредоточенный порт – модель генератора с конечным

Среды в электродинамике

1. Изотропные магнито-диэлектрики

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' \qquad \dot{\mu} = \mu' - i\mu'' \qquad \varepsilon'' << \varepsilon' \qquad \mu'' << \mu'$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon} \end{bmatrix}$$

2. Проводники: $|\varepsilon|, |\mu| << \sigma^e$

3. Анизотропные магнито-диэлектрики

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{bmatrix}$$

4. Гиротропные среды

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. Бианизотропные среды

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{E} + \mathbf{b}\mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu}\mathbf{H} + \mathbf{c}\mathbf{E} +$$

6. Искусственные среды (метаматериалы)

Поверхности и граничные условия 1

Граница раздела двух магнито-диэлектриков

$$\underline{\underline{E}}_{\tau 1} = \underline{\underline{E}}_{\tau 2} \qquad \underline{\underline{H}}_{\tau 1} = \underline{\underline{H}}_{\tau 2}$$

Поверхность идеального проводника

$$\underline{\underline{E}}_{\tau} = 0$$

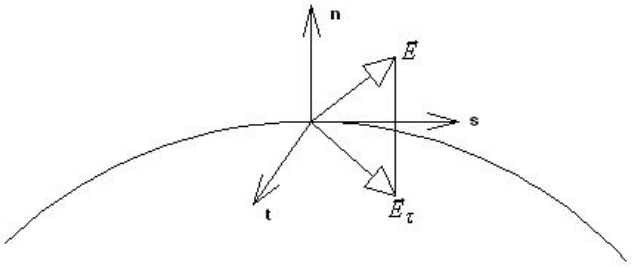
Поверхность идеального магнетика

$$\underline{\underline{H}}_{\tau} = 0$$

Импедансная поверхность

$$\mathbf{E}_{\tau} = \mathbf{Z}\left[\mathbf{n}\mathbf{H}_{\tau}\right]$$

Частный случай – поверхность с конечной проводимостью

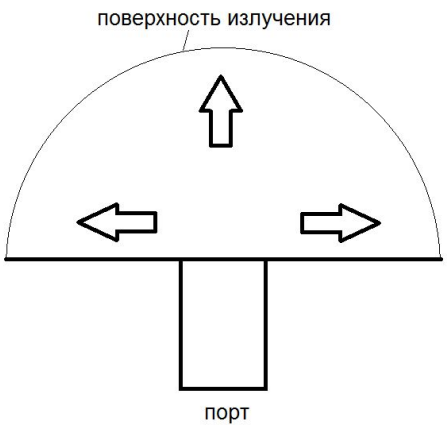


Имеется также анизотропные импедансные граничные условия

Поверхности и граничные условия 2

Поверхность и условия излучения

Идеально согласованный слой:



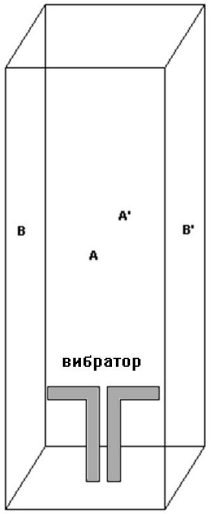
искусственно синтезированная структура, имеющая малый коэффициент отражения в заданном диапазоне частот в зоне видимых углов падения

Сосредоточенные RLC граничные условия применяются при моделировании сосредоточенных элементов: конденсаторов, резисторов, индуктивностей

Поверхности и граничные условия 3

Граничные условия периодичности. Применяются при анализе периодических структур. Они устанавливают связь между полями на границах периода (master, slave).

В периодических структурах возникает еще один вид источников: **порт Флоке**



Поверхности симметрии.
Виртуальные поверхности, применение которых облегчает анализ структур, содержащих плоскости симметрии