

7. Расчет полуволновой вибраторной антенны

Начиная с этого примера, будем широко применять описание задачи в картах. Карты – это команды, которые вводятся в поле программы EDITFEKO. Данный пример показывает расчет диаграммы направленности излучения и входного сопротивления симметричного полуволнового вибратора, показанного на рис. 26.1. Антенна состоит из двух проводников, между которыми находится источник напряжения. Длина волны $\lambda = 4$ м, длина вибратора антенны 2 м, и радиус провода 2 мм. Частота 75 МГц.

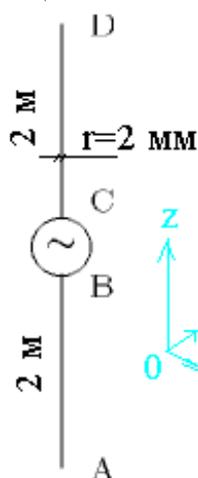


Рис. 7.1. Полуволновый симметричный вибратор (общая длина от точки A до точки D равна половине длины волны)

Входной файл, который создается в EDITFEKO для анализа полуволновой вибраторной антенны, следующий:

```

**Полуволновая (Lambda/2) симметричная антенна в свободном пространстве.
**Длина волны 4 м.
#lambda = 4
** Параметры сегментации: длина и радиус вибратора
#seg_len = #lambda / 20
#seg_rad = 0.002
IP   #seg_rad   #seg_len  **определение радиуса провода и длины сегмента
** Определение точек вибратора
#h = #lambda/4      ** Половина длины вибратора
#l = 0.4*#seg_len  ** Половина длины сегмента питания (она должна быть
меньшая, чем 0.5*#seg_len, чтобы поместить только один
сегмент)
DP   A           0.0   0.0   - #h
DP   B           0.0   0.0   - #l
DP   C           0.0   0.0   #l
** Создание нижней половины вибратора без сегмента питания

```

```

BL   A   B
** Зеркальное отражение нижней половины вибратора вверх, относительно ху -
плоскости при z=0 командой, которая устанавливает электрическую симметрию
относительно плоскости z=0)
SY   1   0   0   2
** Создание метки 1 сегмента питания
LA   1
BL   B   C
** Конец ввода геометрии
EG   0   0   0   0   0
** Установка частоты расчета (приблизительно 75 МГц)
#freq = #c0 / #lambda      (#c0 скорость света в вакууме)
FR   1   0                  #freq
**Источн. возбуждения как напряжение в промежутке (E-поле) на сегменте с меткой
1
A1   0   1                  1.0  0.0
** Вычисление поля в дальней зоне в вертикальной плоскости (far field)
FF   1   37   1   0   0.0  0.0  5.0  0.0
** Конец
EN

```

Первая линия входного файла должна быть строкой комментария или пустой строкой. Далее следует карта **IP**, которая определяет радиус провода и максимальную длину сегмента. Здесь максимальная длина сегмента была установлена равной $\lambda/20 = 0.2$ м. Симметричная антенна расположена по оси z между двумя точками A (при $z = -1$) и D (при $z = 1$).

Источник возбуждения помещен в середину вибратора при $z = 0$.

Вибратор мог быть создан с одной картой **BL**, подключая точки A и D. (См. пример **dipole.pre**) Однако, если используется один сплошной провод, сегмент питания не может быть специфицирован меткой, и тогда не используется преимущества симметрии. Чтобы сегмент питания имел уникальную метку, антенна создана из трех частей, а именно A-B, B -C и C -D. Линия между B и C лежит симметрично относительно $z = 0$, и расстояние между B и C должно быть меньше, чем максимальная длина сегмента, так, чтобы был создан только один сегмент.

Сначала точки A и B связываются линией с помощью карты **BL**. Это создает нижнюю половину вибратора. Плоскость симметрии при $z = 0$ тогда определяется как идеальная электрическая стенка (карта **SY**). Эта плоскость выполняет отражения существующих сегментов, чтобы создать верхнюю половину вибратора. Конечно, также возможно создать верхнюю половину вибратора с помощью другой карты **BL** и тогда не использовать симметрию. Все структуры после карты **LA** будут иметь метку заданную этой картой. Поскольку сначала карта **LA** не используется, все сегменты, созданные к этому моменту времени имеют заданную по умолчанию метку 0. Карта **BL**, подключающая точки B и C следует за картой **LA** и таким образом создает сегмент с уникальной меткой (метку 1 в этом случае) поскольку никакие другие

сегменты не созданы после этой карты **LA**. Эта метка используется картой **A1**, чтобы определить сегмент питания. Карта **EG** заканчивает ввод геометрии.

Решения для этого примера получим, запустив PREFEKO и FEKO.

В результате расчета данные можно вывести с помощью POSTFEKO, а можно видеть в выходном файле с расширением *.out.

Рассчитанный входной импеданс антенны равен $Z = (78.4 + j 31.0)$ Ом и максимальное усиление 2.18 dB. Это очень близко соответствует данным, полученным из теоретического анализа вибраторной антенны.

Построение вибратора в CADFEKO

Для сравнения, построим этот вибратор, используя программу CADFEKO.

Выбираем единицы измерения длины (рис. 7.2).

Вводим первую переменную lambda – длина волны, равная 4, а также переменные:

#h = #lambda/4

#l = 0.4*#seg_len

** Половина длины вибратора

** Половина длины сегмента питания

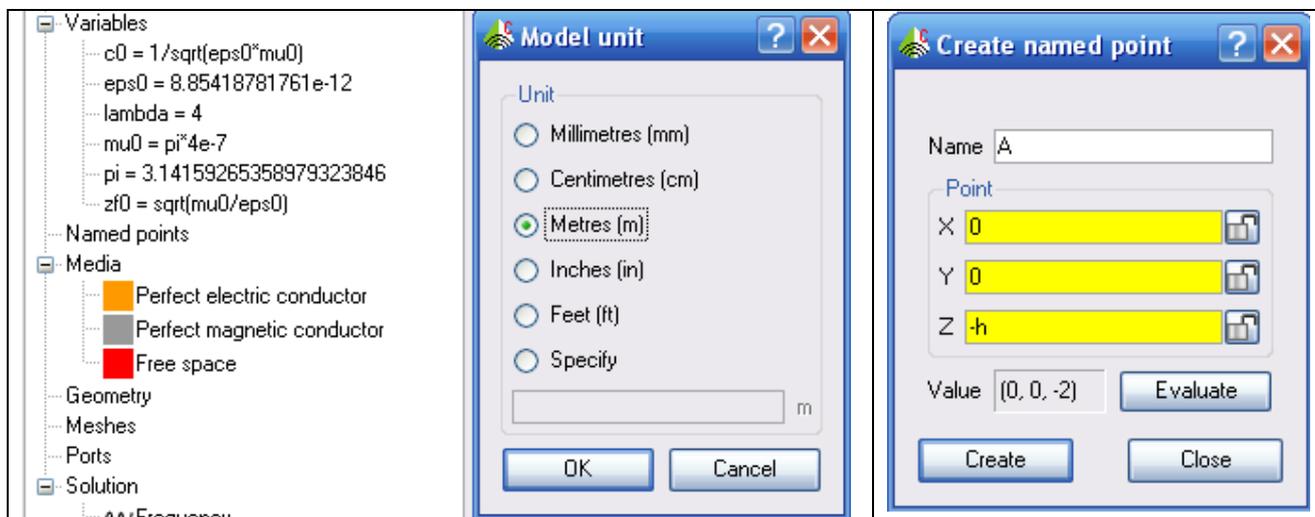


Рис. 7.2. Задание единиц черчения модели

Рис. 7.3. Создание точки «А»

Создание первой точки выполняется нажатием правой кнопки мышки на **Named Point** в дереве проекта. Появляется диалог рис. 7.3, в который вводим координаты поименованной точки и ее имя А.

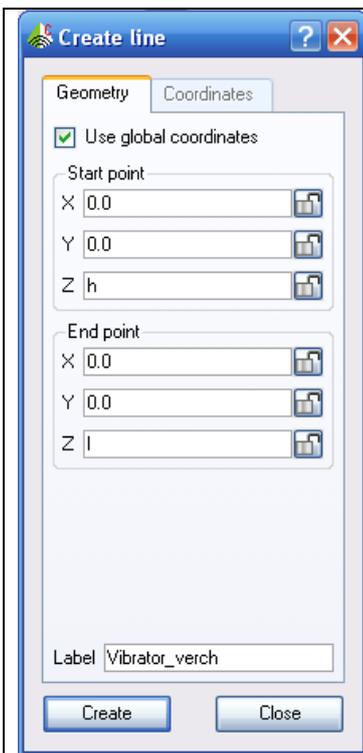


Рис. 7.4. Создание линии вводом координат двух точек

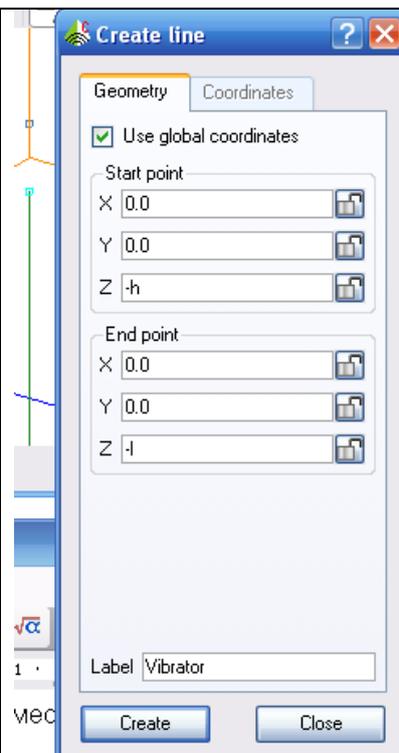


Рис. 7.5. Черчение половины вибратора (между точками A и B)

Черчение линии можно выполнить командой Create line, по которой появляется диалог рис. 7.4, в который мы вводим координаты начальной и конечных точек.

Далее создадим проводной порт. Для этого выделим провод Wire3, нажимая на это имя в дереве подробностей.

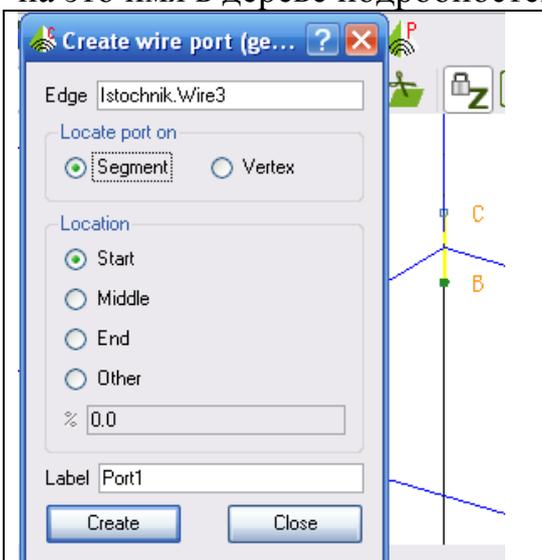


Рис. 7.6. Создание проводного порта

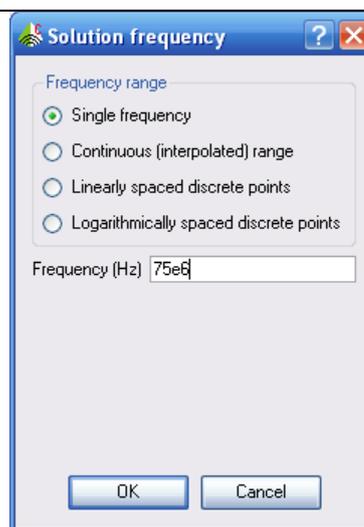


Рис. 7.7. Введение частоты расчета

Далее введем частоту расчета 75 МГц и выполним разбиение проводной структуры на сегменты командой Mesh -> Create mesh. Параметры разбиения можно установить в окнах диалога **Create Mesh**, как указано на рис. 7.8.

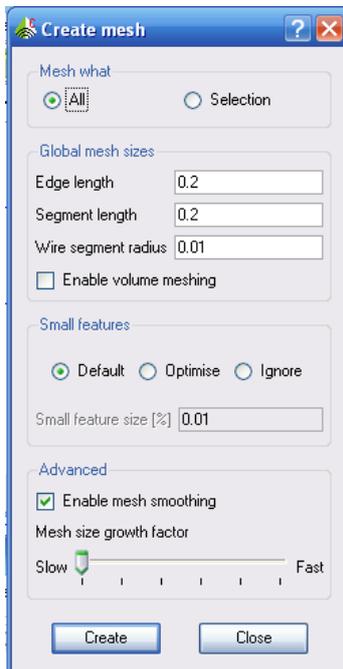


Рис. 7.8. Параметры сетки разбиения: длина стороны треугольника, длина сегмента, радиус проводного сегмента

Запустим программу на решение командой **Start -> FEKO**. После выполнения решения вызовем программу POSTFEKO и выведем трехмерную ДН (рис. 7.9).

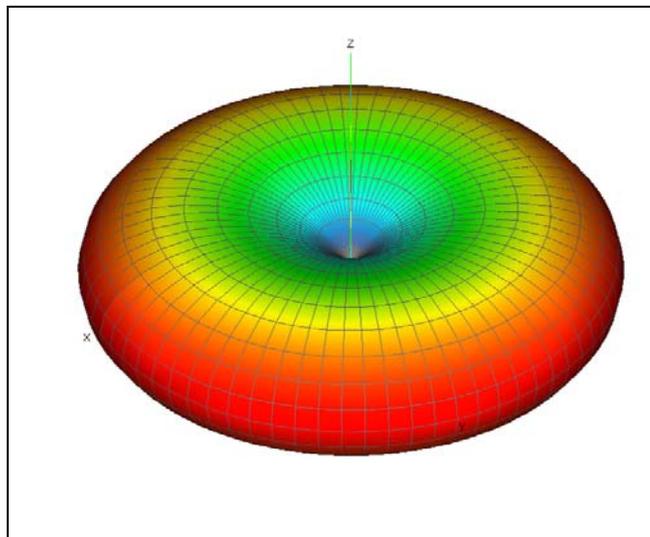


Рис. 7.9. Диаграмма направленности в трехмерном представлении

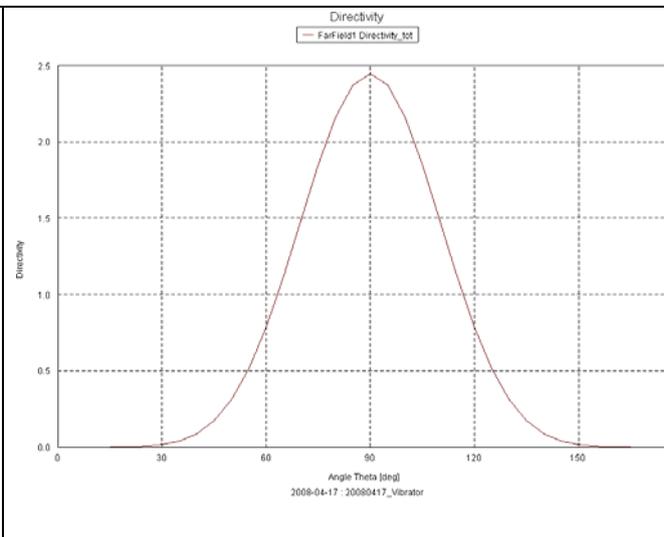


Рис. 7.10. Сечение диаграммы направленности

Выберем в меню **View -> Add 2D Graph** характеристику Far Fields и выберем направленность в зависимости от угла **Theta** (рис. 7.10).

8. Вибраторная антенна над металлической платой, моделируемой методом дифракции

В этом примере выполняется моделирование вибратора, стоящего перпендикулярно проводящей плате 5 м x 5 м. Задача решается методом теории дифракции UTD (рис. 8.1).

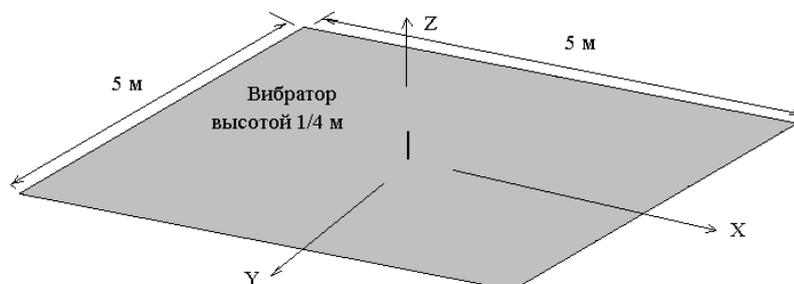


Рис. 8.1. Вибраторная антенна, стоящая вертикально к земляной плате

Плата описывается как плата UTD, поэтому лучи, падающие на край этой платы, генерируют токи, которые дают вклад во вторичное излучение. FEKO автоматически определяет контактные точки между проводами и многоугольными платами (а сама проводящая плата, как противовес, описывается картами VO и GF).

Входной файл

```
** Параметры для геометрии
#lam = 1          ** Длина волны
#h = #lam/4      ** Высота несимметричной антенны
#a = 5*#lam      ** Длина стороны платы

** Параметры сегментации для проводной антенны
#seglen = #lam/20  **Длина сегмента разбиения вибратора
#segrad = #lam/1000 **радиус сегментов вибратора
IP          #segrad          #seglen

** Определение угловых точек платы
DP P1          #a/2 #a/2 0.0
DP P2          -#a/2 #a/2 0.0
DP P3          -#a/2 -#a/2 0.0
DP P4          #a/2 -#a/2 0.0

** Создание платы
PY P1 P2 P3 P4

** Точки для несимметричной антенны
DP A          0.0 0.0 0.0
#temp = 0.9*#seglen
DP B          0.0 0.0 #temp
DP C          0.0 0.0 #h
```

** Создание несимметричной антенны (сегмент возбуждения с меткой 1)

```
LA 1
BL A B
LA 0
BL B C
```

** Параметры для UTD (учитываются дифракция от ребра и углов)

```
UT 1 2 0 0 7 0
```

** Конец геометрии

```
EG 0 0 0 0 0
```

** Возбуждение генератором напряжения (1 Ватт)

#freq = #c0 / #lam

```
FR 1 0 #freq
A1 0 1 1.0 0.0
PW 1 1.0
```

** Вычисление поля в дальней зоне в 2 вертикальных плоскостях

```
FF 1 181 1 0 0.0 0.0 2.0 0.0
FF 1 181 1 0 0.0 45.0 2.0 0.0
```

** Конец

EN

После выполнения расчета можно просмотреть файл example_20.out, для того, чтобы убедиться в правильности полученных результатов расчета.

Рис. 8.2 и 8.3 показывают диаграммы направленности излучения в вертикальной плоскости.

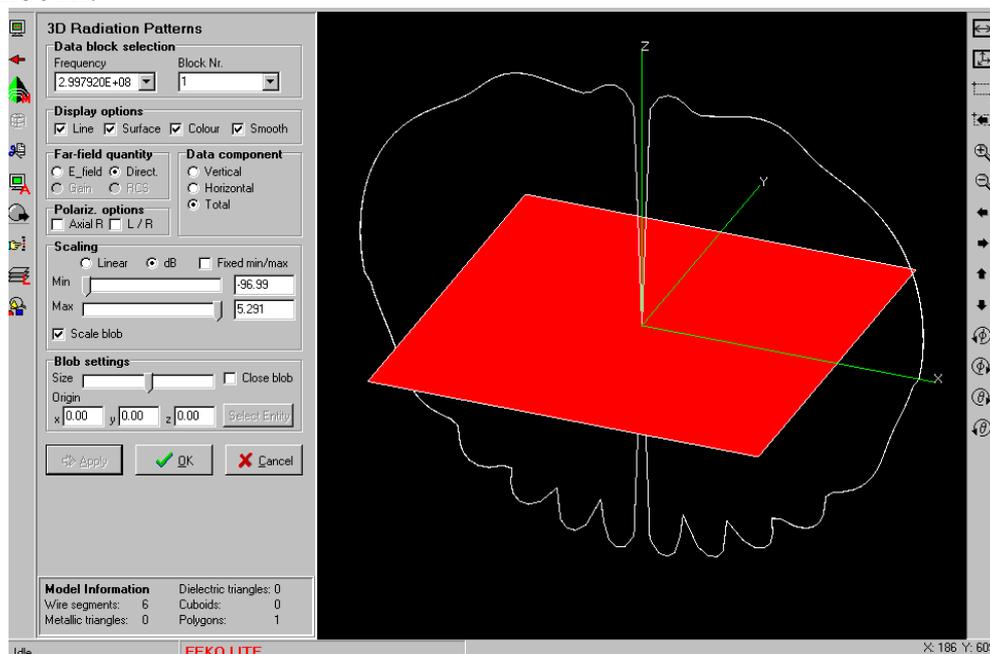


Рис. 8.2. Электрическое поле в дальней зоне $|E_{\text{Theta}}|$ вертикальной антенны над проводящей платой

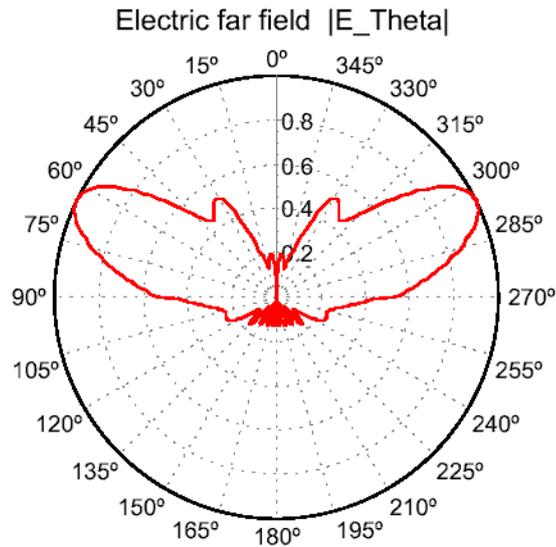


Рис. 8.3. Азимутальная диаграмма направленности $\theta = 70^\circ$

Решение этой задачи методом моментов

В методе моментов плата разбивается на ячейки и задается как металлическая плата. В этом случае файл, созданный в EDITFEKO, следующий:

```
#lam=1                # длина волны
#h=#lam/4             # высота
#a=5*#lam
#segedge=0.1
#seglen=#lam/20
#segrad=#lam/1000
IP                    #segrad #segedge #seglen
DP P1                #a/2    #a/2    0
DP P2                -#a/2   #a/2    0
DP P3                -#a/2  -#a/2    0
DP P4                #a/2   -#a/2    0
BP P1 P2 P3 P4
DP A                  0      0      0
#temp=0.9*#seglen
DP B                  0      0      #temp
DP C                  0      0      #h
LA 1
BL A B
LA 0
BL B C
EG 0 0 0 0          1
#freq=#c0/#lam
A1 0 1              1      0
FR 1                #freq
PW 1 0              1
FF 1 19 37 0        0      0      10      10
```

```

FF 1 1 181 0 45 0 0 1
FF 1 9 1 0 0 0 90 0
EN

```

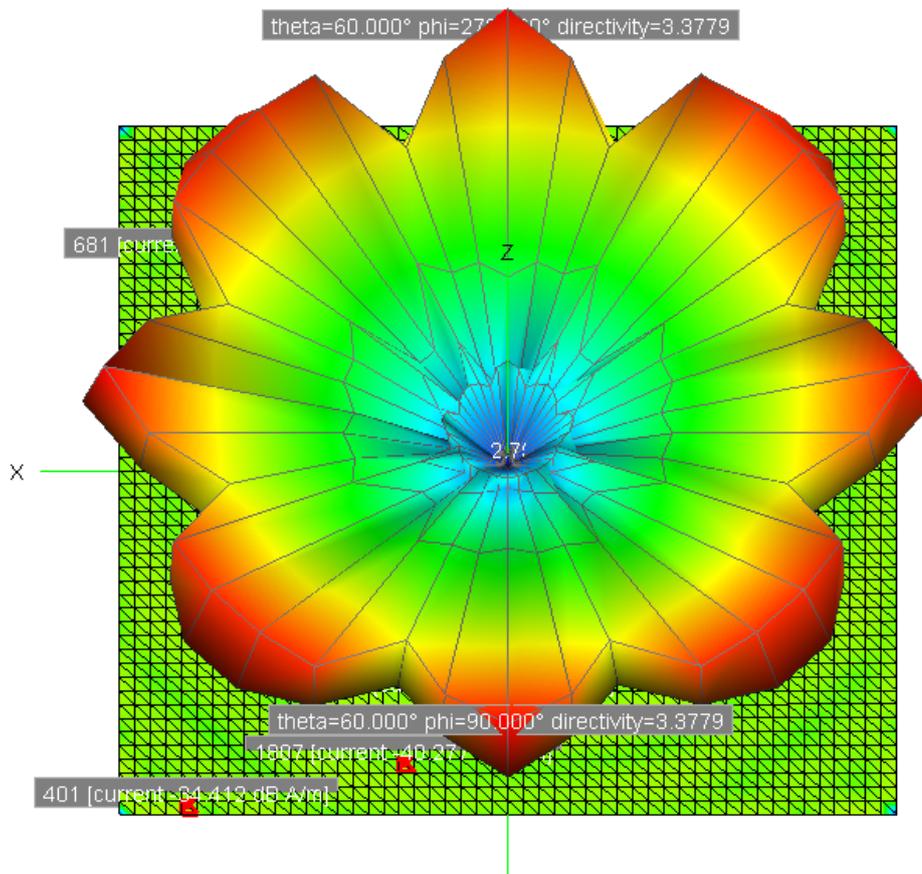


Рис. 8.4. Трехмерный вид ДН вертикальной антенны над платой, которая считается методом моментов

Теперь рассчитаем эту же задачу методом UTD. В этом случае файл следующий:

```

#lam=1           :длина волны
#h=#lam/4       :размер плеча вибратора
#a=5*#lam
#segedge=0.1
#seglen=#lam/20
#segrad=#lam/1000

```

```

IP           #segrad #segedge #seglen
DP P1       #a/2    #a/2    0
DP P2       -#a/2   #a/2    0
DP P3       -#a/2   -#a/2   0
DP P4       #a/2    -#a/2   0
**BP P1 P2 P3 P4
PY P1 P2 P3 P4
DP A        0      0      0

```

:описание методом UTD

```

#temp=0.9*#seglen
DP B      0    0    #temp
DP C      0    0    #h
LA 1
BL A B
LA 0
BL B C
EG 0 0 0 0      1
#freq=#c0/#lam
A1 0 1      1    0
FR 1      #freq
PW 1 0      1
FF 1 19 37 0  0    0    10    10
FF 1 1 181 0  45    0    0    1
FF 1 9 1 0  0    0    90    0    # дальнее поле
OS 1 1      # нахождение токов на металле

EN      #конец файла

```

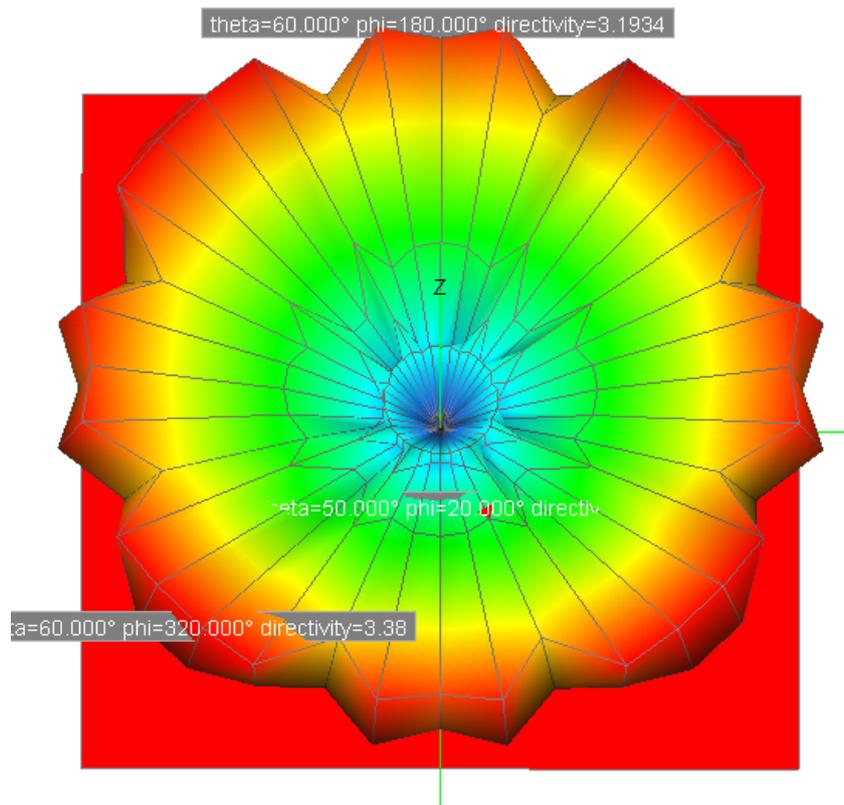


Рис. 8.5. ДН вертикальной антенны над плоскостью, описанной методами теории дифракции

Решение выполняется намного быстрее, чем в методе моментов.

Добавляем карту UT. В этом решении можно увидеть группы лучей, которые падают на ребра и углы прямоугольной плоскости (рис. 8.7).

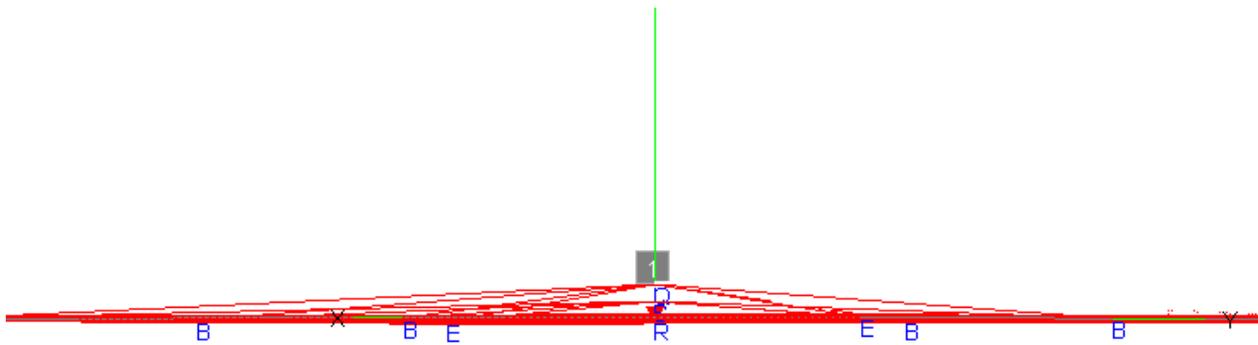
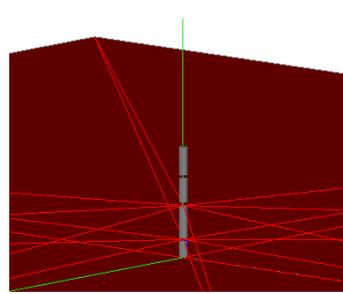
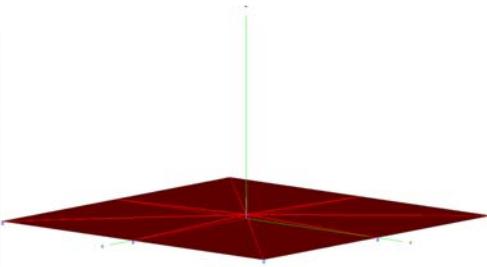


Рис. 8.7. Лучи, падающие из сегмента вертикально расположенной вибраторной антенны на металлическую площадку. 10-я группа лучей, падающих от сегментов вертикальной антенны на ребра и углы прямоугольной платы, с номера лучей 118 по 130

Группы лучей формируются так, что они исходят от каждого сегмента вертикально стоящей антенны. Поэтому мы видим лучи распространения электромагнитных волн в структуре вибраторной антенны от каждого сегмента, идущие к ребрам и углам земляной платы. Эти лучи показывают, какие ребра учитывают дифракцию электромагнитных волн. Эти возможности FEKO позволяют рассчитывать структуры с размерами, равными десятки длин волн.

В версии FEKO5.4 имеется возможность задать свойства платы в CADFEKO.

<p>Установка свойств плоскости отражения, расчет методом дифракции (UTD)</p>	



Меняя группы, можно видеть, как чертятся новые группы лучей.

9. Вибраторная антенна перед плоскостью UTD

Рассмотрим симметричную антенну, расположенную перед металлической платой, которая используется как рефлектор (рис. 9.1). Рассчитаем структуру методом моментов, а затем найдем токи на поверхности отражателя, используя метод физической оптики (PO). В этом примере, плата будет описана с помощью теории дифракции (UTD).

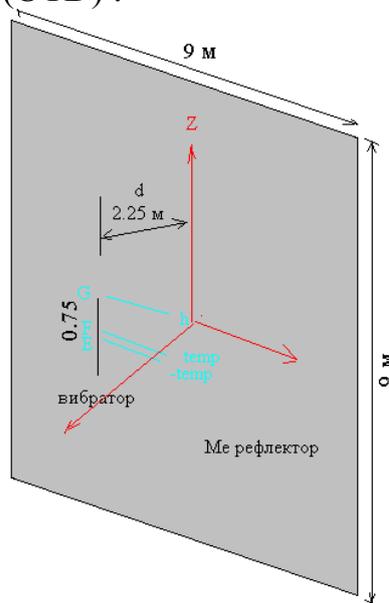


Рис. 9.1. Геометрия вибраторной антенны перед плоскостью

В методе физической оптики строятся пути лучей, распространяющихся от сегментов источника и падающие на поверхности отражающих объектов (рис. 9.2). Отметим, что при описании плоскости, не задаются количество лучей для вывода. Этот вывод выполняется во время постпроцессорной обработки, поскольку это требует большой памяти.

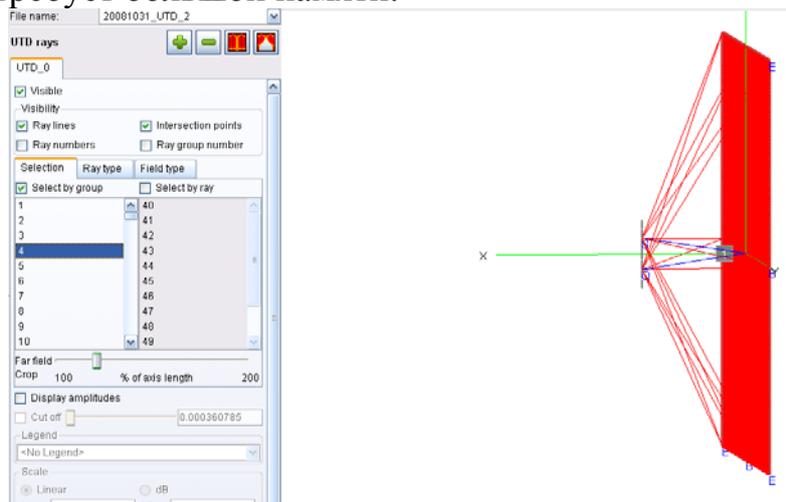


Рис. 9.2. Распространение пути лучей, распространяющиеся от сегментов вибратора к граням платы

Входной файл показан ниже

** Полуволновой вибратор перед металлической платой с длиной стороны $3*\lambda$, отстоящей от антенны на расстояние $d=3/4$ лямбда. Вибратор моделируется, используя МоМ, а плата методом UTD.

```
#lambda = 3          ** Длина волны
#h = #lambda/4       ** высота вибратора
#a = 1.5*#lambda     ** Половина стороны плоскости
#d = 3/4*#lambda     ** Расстояние между вибратором и плоскости
#seglen = #lambda/28 ** Максимальная длина сегмента разбиения
#rho = 0.002*#lambda ** радиус сегмента
** параметры разбиения на сегменты
IP   #rho #seglen

** Верхней половине вибратора назначена метка 0
#temp = 0.45*#seglen
DP E   #d  0.0  - #temp          (точка E)
DP F   #d  0.0  #temp           (точка F)
DP G   #d  0.0  #h              (точка G)
LA  0
BL  F    G
** Зеркальное отражение вокруг плоскости z=0 (электрическая стенка)
SY  1    0    0    2    0
** Сегменту возбуждения назначается метка 1
LA  1
BL  E    F
** Создание плоскости, рассчитываемой методом UTD
DP  A          0.0  - #a  - #a
DP  B          0.0  #a   - #a
DP  C          0.0  #a   #a
DP  D          0.0  - #a  #a
PY  A    B    C    D

** Параметры, задаваемые для метода UTD:
** GO и дифракция, никакая двойная дифракция и никакая граничная дифракция
UT  1    1    0    0    3    0
** Конец ввода геометрии
EG  1    0    0    0    0
** Расчет частоты, зависящей от длины волны
#freq = #c0 / #lambda
FR  1    0    #freq
** Возбуждение посредством генератора напряжения с мощностью 1 Ватт
A1  0    1    1.0  0.0
PW  1    0    1
** Поле в дальней зоне (ДНА в горизонтальной плоскости)
FF  1    1    181  0    90.0  0.0  0.0  2.0
** Ближние поля
FE  1    70  1    1    0    -1.97  0.0  0.0  0.1  0.0  0.0
** Конец
```

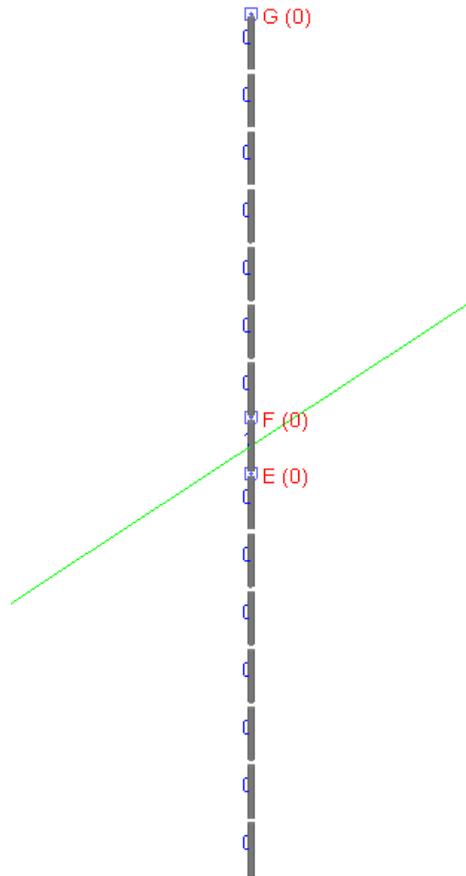


Рис. 9.2. Разбиение вибратора на секции

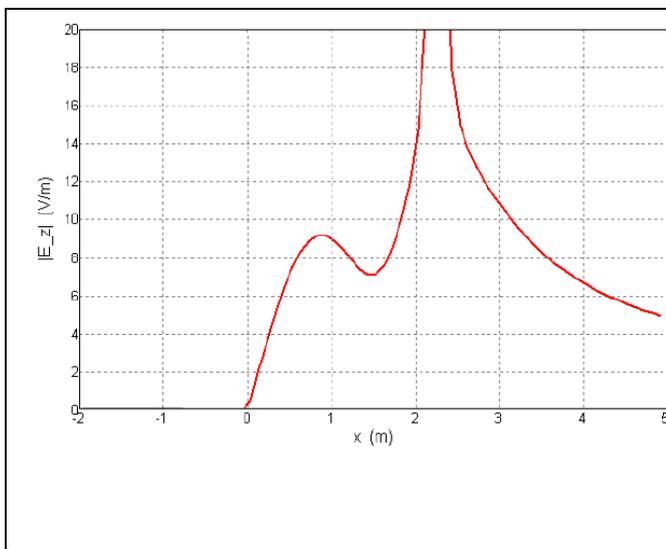


Рис. 9.3. Электрическое ближнее поле вдоль оси X

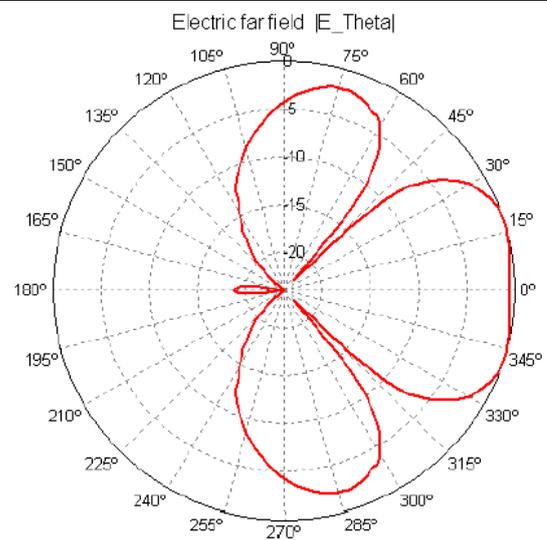


Рис. 9.4. Азимутальная диаграмма направленности вибратора перед плоскостью

#lambda=3
 ** Установка длины волны
 #lambda = 4
 ** Параметры сегментации

```

#h = #lambda / 4
#a = 1.5*#lambda
#d = 3/4*#lambda
** Расстояние между вибратором и отражающей плоскостью
#seglen = #lambda/28
** Максимальная длина сегмента
#rho = 0.002*#lambda
** радиус сегмента
IP          #rho          #seglen
** Верхней половине вибратора назначена метка 0
#temp = 0.45*#seglen
DP E          #d      0      -#temp
DP F          #d      0      #temp
DP G          #d      0      #h
LA 0
BL F G
** Зеркальное отражение вокруг плоскости z=0 (электрическая стенка)
SY 1 0 0 2 0
** Сегменту возбуждения назначим метку 1
LA 1
BL E F

** Создание плоскости, рассчитываемой методом UTD
DP A          0      -#a      -#a
DP B          0      #a      -#a
DP C          0      #a      #a
DP D          0      -#a      #a
PY A B C D

** Параметры для UTD:
** GO и дифракция, никакая двойная дифракция и никакая дифракция на границе
UT 1 1 0 0 3 0
** Конец геометрического входа
EG 1 0 0 0 1

** Частота
#freq = #c0 / #lambda

FR 1          #freq
** Возбуждение посредством генератора напряжения с мощностью 1 Ватт

A1 0 1          1      0
PW 1 0          1

** Поле в дальней зоне (ДНА в горизонтальной плоскости)
FF 1 9 20 0 0 0
** Задание для расчета ближнего поля
FE 1 10 10 2 0 -1 -1 1 2 2 2
EN
** Конец

```

Решение задачи посмотрим в POSTFEKO. После запуска POSTEKO можно рассмотреть все компоненты модели. Плоскость, задаваемая для расчета методом UTD окрашена в красный цвет (рис. 9.5).

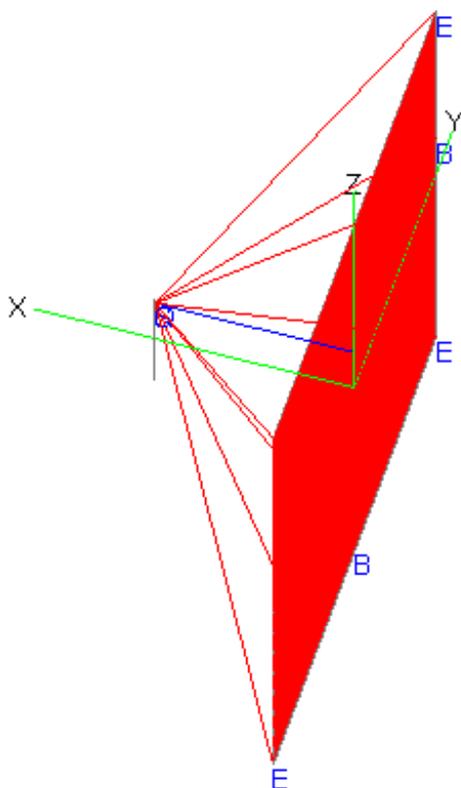


Рис. 9.7. Просмотр траекторий лучей

Лучи, которые падают на проводящую плоскость, разбиваются по группам и по номерам лучей. Номера групп располагаются в левом столбце, а номера лучей – в левом столбце таблицы в разделе UTD_gaus (рис. 9.8).

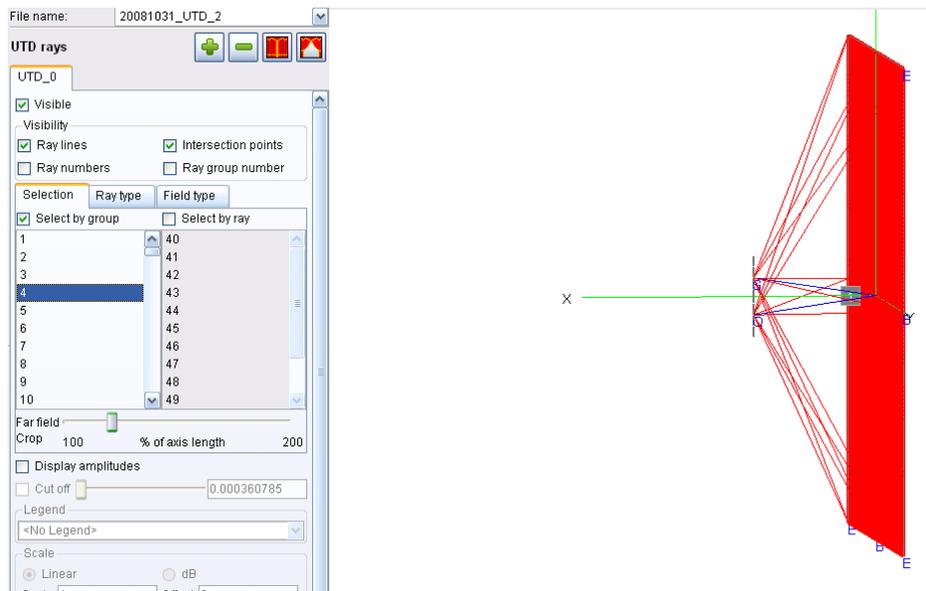
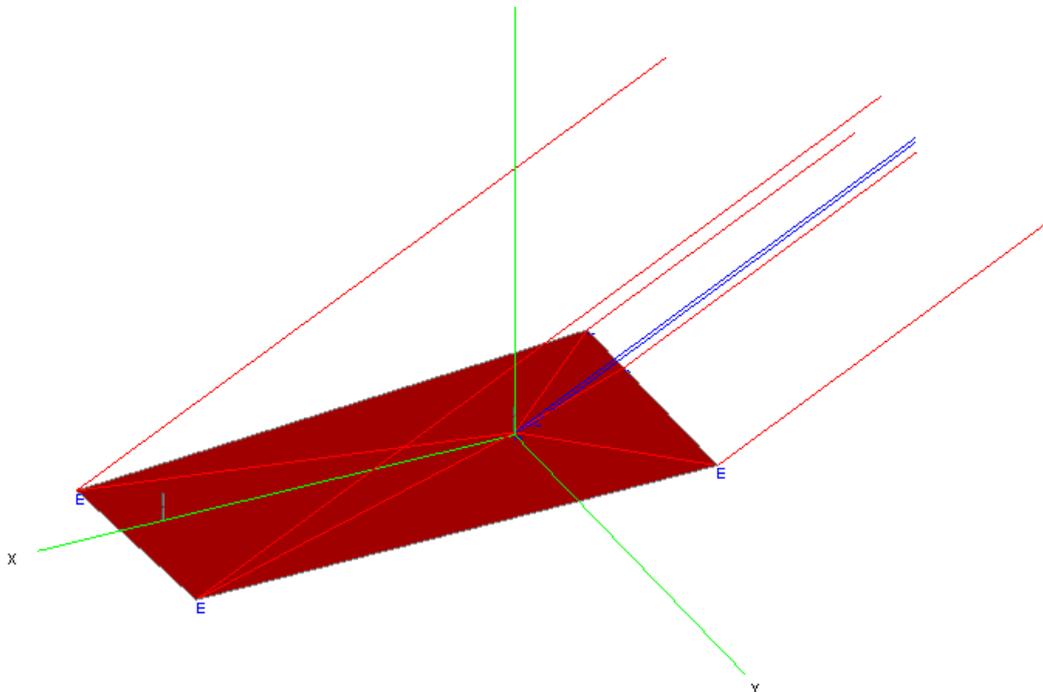
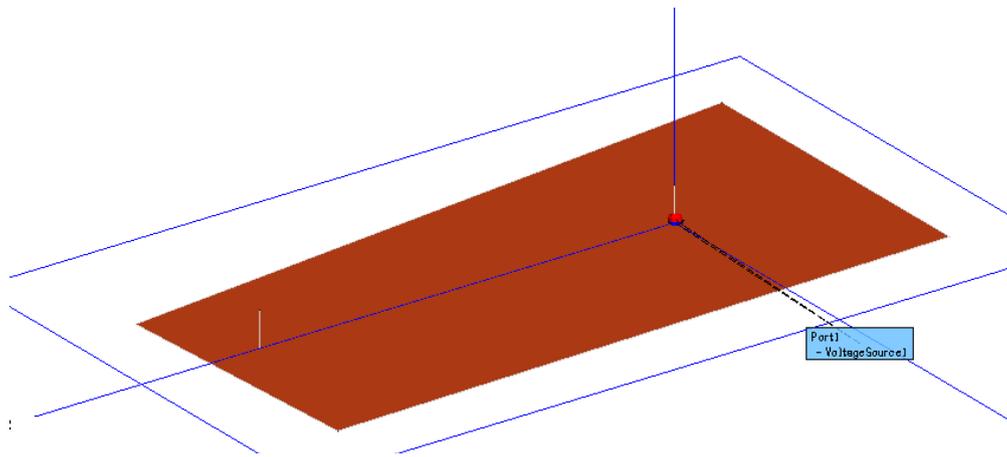


Рис. 9.33. Выделение и вывод на экран 4-й группы лучей от 40 до 52 луча

Все лучи, падающие на плоскость, разделены как объемные трубки и считаются распространяющимися как плоская волна. Количество лучей выбирается в соответствии с необходимой точностью.

Итак, в этой задаче, при анализе падающих лучей электромагнитных волн на проводящую плоскость было показано, как выводить отдельные группы лучей. Визуализация лучей нужна для контроля постановки задачи.





UTD/GO rays

RAY_0

Visible

Visibility

Ray lines Intersection points

Ray numbers Ray group number

Selection **Ray type** Field type

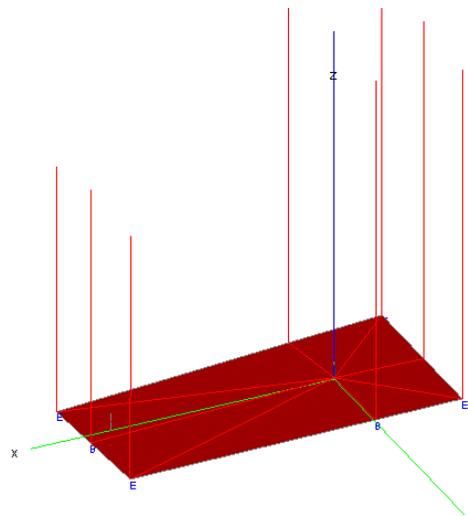
Select by group Select by ray

9277	111385
9278	111386
9279	111387
9280	111388
9281	111389
9282	111390
9283	111391
9284	111392
9285	111393
9286	111394
9287	

Far field

Crop 100 % of axis length 200

Display amplitudes



10. Рупорная антенна перед параболическим рефлектором

В этом примере моделируется рупорная антенна перед параболическим рефлектором. Рефлектор рассчитывается методом физической оптики РО, а рупор методом моментов МоМ. Даже если метод МоМ развязан с методом РО, расчет взаимной связи между базовыми функциями МоМ, и треугольниками в методе РО могут быть весьма длительными. Тем более, если решение должно быть повторено многократно, например при оптимизации формы рефлектора.

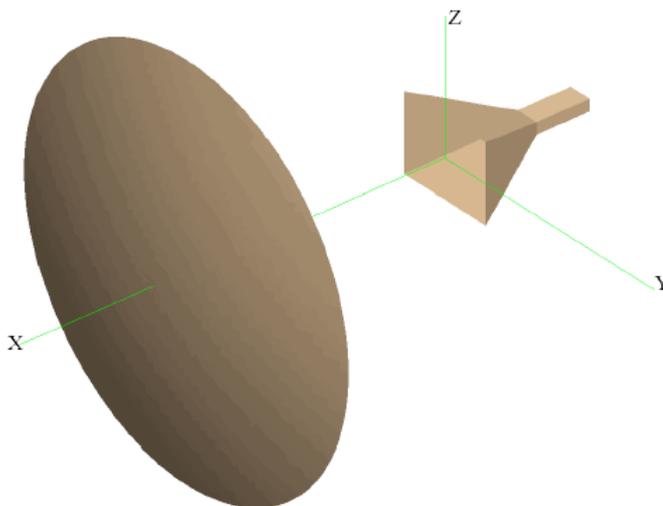


Рис. 10.1. Рупор перед параболическим рефлектором

В процессе решения окружим рупорную антенну шестью плоскостями, вычислим на них ближние поля и запишем их в файлы *.efe и *.hfe для последующего использования. Также будет рассчитано дальнейшее поле и записано в файл *.ffe для использования как точечный источник с заданной диаграммой направленности.

Далее рупорная антенна может быть удалена, используя теорему эквивалентности, и её апертура создана картой AP. Используем эти ближние поля, чтобы определить эквивалентную апертуру, чтобы заменить рупор. Эта апертура тогда используется для возбуждения параболического отражателя.

Далее выполним моделирование рупора и рефлектора одновременно для проверки.

Наконец, выполним этот расчет, используя дальние поля рупорной антенны, как точечный источник

Итак, задача будет разбита на несколько задач.

- Расчет параболического рефлектора
- Расчет рупорной антенны в отсутствие рефлектора
- Сохранение ближнего поля вокруг рупорной антенны в файлы
- Замена рупорной антенны эквивалентным источником

10.1 Расчет параболического рефлектора

Сначала рассмотрим параболический рефлектор, который возбуждается точечным вибратором Герца, который помещен в фокус параболического рефлектора. Радиус, фокус и высота параболоида связаны соотношением:

$$f = \frac{R^2}{4h}$$

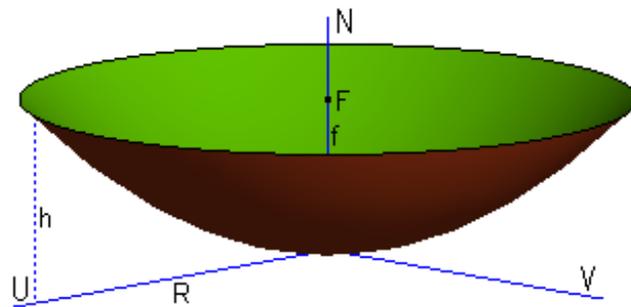


Рис. 10.2. Чертеж параболического вибратора

В фокусе параболического зеркала расположим точечный источник излучения электромагнитных волн. Рефлектор металлический и он отражает падающие на него лучи параллельно оси Z.

Входной файл следующий:

```
** Параболический отражатель с вибратором Герца в его фокусе
**
#lam = 1                ** Длина волны
#r = 4*#lam             ** Радиус параболического отражателя
#h = 2*#lam             ** Высота параболического отражателя
#f = (#r^2) / (4*#h)    ** Фокусное расстояние параболической антенны
```

```
** Параметры сегментации
```

```
#tri_len = #lam/5
```

```
IP #tri_len
```

```
СОЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТИ РЕФЛЕКТОРА
```

```
DP A      0  0  0
DP B      1  0  00
DP C      0  0  #r
DP D      #h 0  #r
```

```
PB B      C      D      90.0 #tri_len ** черчение четверти параболоида
```

**** Использование симметрии**

```
SY 1 0 3 2
```

**** Расчет рефлектора методом физической оптики PO**

```
PO 0 1 1 0 0
```

```
EG 1 0 0 0
```

****конец ввода геометрии**

**** Возбуждение**

```
#freq = #c0 / #lam
```

```
FR 1 0 #freq
```

**** частота**

```
A5 0 1.0 0.0 #f0 0 0 0 0 **точечный ист.
```

**** расчет поля в дальней зоне**

```
FF 1 361 1 0 0 0 1
```

**** Конец**

EN

Металлический параболический отражатель можно рассчитать методом моментов, и в этом случае его поверхность будет разбита на треугольники, а можно описать как поверхность, моделируемую методом геометрической оптики. Для того, чтобы описать отражатель таким способом, используется карта **PO** (рис. 10.3).

```
#lam=1
#r=4*#lam
#h=2*#lam
#f=(#r^2)/(4*#h)

#tri_len=#lam/5
IP
DP A 0 0 #tri_len
DP B 1 0 0
DP C 0 0 #r
DP D #h 0 #r
PB A B C D 90 #tri_len
SY 1 0 3 2
PO 0 0 0 0 0 0
PO 0 1 1 0 0 0
```

Рис. 10.3. Задание условий, по которому металлическая поверхность параболического зеркала обрабатывается методом физической оптики

В фокусе ставится источник, в виде диполя Герца. Его параметры - положение и угол ориентации - задаются в карте A5. Устанавливаем его направление вертикальное, считая, что он создает линейную вертикальную поляризацию.

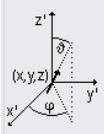
A5 - Electric Hertzian dipole

New source Add to sources

Magnitude of $I dl$ (A m)

Phase of $I dl$ (degrees)

Dipole position



x position

y position

z position

θ angle

φ angle

```

#lam=1
#r=4*#lam
#h=2*#lam
#f=(#r^2)/(4*#h)

#tri_len=#lam/5
IP
DP A 0 #tri_len 0
DP B 1 0 0
DP C 0 0 #r
DP D #h 0 #r
PB A B C D
SY 1 0 3 2

PO 0 1 1 0 0
EG 0 0 0 0 0
#freq=#c0/#lam
FR 1 #freq

```

Рис. 10.4. Описание диполя Герца, расположенного в фокусе

FF - Calculate the far fields

Select field position

No calculation

Fields calculated as specified below

Fields calculated only in incident direction

Only integrate field over area given below

Calculate only the scattered part of the field

Directivity Gain

Number of θ points

Number of φ points

Initial θ

Initial φ

θ increment

φ increment

Compute spherical mode coefficients

Maximum mode index N

```

#lam=1
#r=4*#lam
#h=2*#lam
#f=(#r^2)/(4*#h)

#tri_len=#lam/5
IP
DP A 0 #tri_len 0
DP B 1 0 0
DP C 0 0 #r
DP D #h 0 #r
PB A B C D
SY 1 0 3 2

PO 0 1 1 0 0
EG 0 0 0 0 0
#freq=#c0/#lam
FR 1 #freq
A5 0 #freq 1 0 #f 0 0

```

Рис. 10.5. Задание расчета дальнего поля

Запускаем этот проект, созданный в EDITFEKO на решение, командой Solve -> FEKO. После окончания расчета, запустим POSTFEKO. Решение можно также видеть в выходном файле .out. Задачу можно решить методом моментов, а можно, используя методы физической оптики. При решении методом моментов требуется 46 МБ памяти.

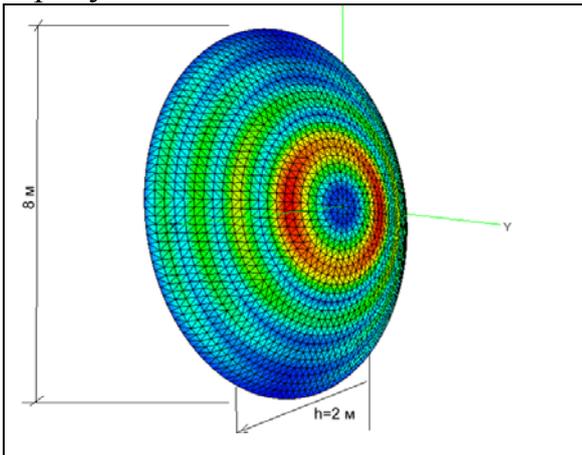


Рис. 10.5. Токи на поверхности параболической антенны

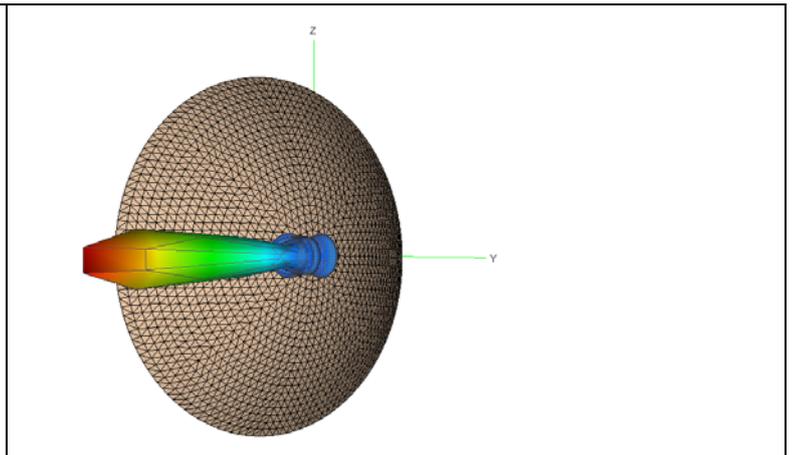


Рис. 10.6. Диаграмма направленности рефлекторной антенны, полученная с помощью POSTFEKO на этапе постпроцессорной обработки

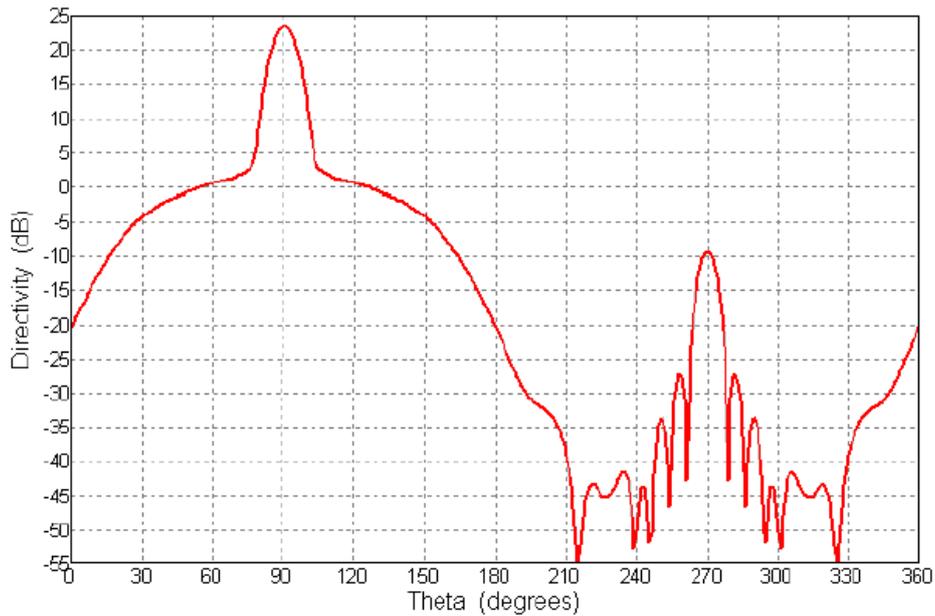


Рис. 10.7. Сечение диаграммы направленности в логарифмическом масштабе в вертикальной плоскости

При расчете методом геометрической оптики, программа занимает только 1.433 МБ и расчет выполняется намного быстрее.

10.2. Замена рупорной антенны перед рефлектором эквивалентными поверхностными токами или ДН в дальнем поле

Начертим рупорную антенну и рассчитаем ближнее поле, излучаемое рупорной антенной в отсутствие рефлектора. Поля будут записаны в файл *.efe и *.hfe, для последующего использования как апертуры возбуждения.

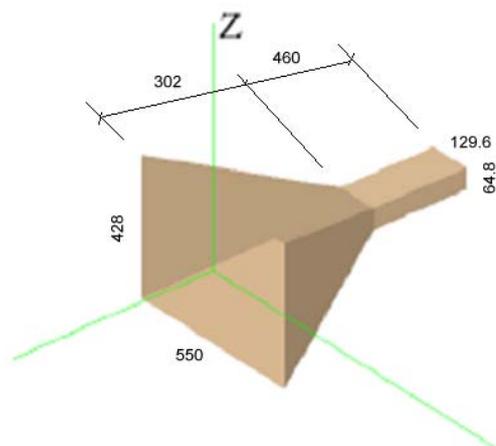


Рис. 10.8. Рупорная антенна (размеры в мм)

Также будет рассчитано дальнейшее поле и записано в файл *.ffe для использования этого файла для модели точечного источника с заданной диаграммой направленности. Приведем текст задачи в EDITFEKO.

```

(**IN 0 "example_35inc")
#sf=0.001 (миллиметры)
SF 1 #sf **коэффициент масштабирования

#freq=1.645e9 **частота расчета
#lam=(#c0/#freq)/#sf **длина волны
#seg_l=#lam/15 **длина сегмента
#tri_l=#lam/7 **длина стороны треугольника
#seg_rad=1.0 **радиус сегмента

IP #seg_rad #tri_l #seg_l
#horn_w=550 **ширина волновода рупорной антенны
#horn_h=428 ** высота волновода рупорной антенны
#horn_l=460 ** длина волновода рупорной антенны
#wg_w=129.6
#wg_h=64.8
#wg_l=302
#feedsep=46 **отступление линии порта от заглушки волновода

** Рассчитанные параметры
#xback=-#wg_l-#horn_l
#xfeed=#xback+#feedsep

**Параметры апертуры
#xpos=300
#xneg=-800
#ypos=300
#zpos=280
**Расчет количества точек съема данных в апертуре рупорной антенны
#sample=#lam/2.5
#Nx=CEIL((#xpos-#xneg)/#sample) ** наименьшее целое число, которое равно или
меньше аргумента

#xskip = (#xpos-#xneg)/#Nx
#xstart = #xneg + #xskip/2
#Ny = CEIL(2*#ypos/#sample)
#yskip = 2*#ypos/#Ny
#ystart = - #ypos + #yskip/2
#Nz = CEIL(2*#zpos/#sample)
#zskip = 2*#zpos/#Nz
#zstart = - #zpos + #zskip/2

** Задание угловых точек для рупора четверти в квадранте y> 0 и z> 0
** Углы задней стенки волновода

```

```

DP  C          #xback  #wg_w/2  #wg_h/2
DP  CZ         #xback  0.0      #wg_h/2
DP  CY         #xback  #wg_w/2  0.0
DP  C0        #xback  0.0      0.0

```

** Точки на перемещении от волновода до рупора

```

DP  B          - #horn_l  #wg_w/2  #wg_h/2
DP  BZ         - #horn_l  0.0      #wg_h/2
DP  BY         - #horn_l  #wg_w/2  0.0

```

** Точки на раскрыве рупора

```

DP  A          0.0  #horn_w/2  #horn_h/2
DP  AZ         0.0  0.0      #horn_h/2
DP  AY         0.0  #horn_w/2  0.0

```

** Точки вдоль провода питания

```

DP  DU         #xfeed  0.0  - #seg_l/2
DP  DO         #xfeed  0.0  #seg_l/2
DP  DZ         #xfeed  0.0  #wg_h/2

```

** Создание поверхности в квадранте $y > 0$ и $z > 0$

** Окончание волновода

```

BP  C  CZ  C0  CY

```

** Вершина волновода

```

BT  C  CZ  DZ
BQ  C  DZ  BZ  B

```

** Стенки волновода

```

BQ  C  B  BY  CY

```

** Стенки рупора

```

BQ  B  A  AY  BY

```

** Вершина рупора

```

BQ  B  A  AZ  BZ

```

** Зеркальное отражение четверти вокруг плоскости $y=0$ (xz-плоскость) - идеальная магнитная стенка.

```

SY  1  0  3  0

```

** Создать половину питающего провода

```

BL  DO  DZ

```

** Симметричная плоскость при $z=0$ (плоскость xy) - идеальная электрическая стенка.

```

SY  1  0  0  2

```

```

** Создать сегмент питания с меткой 1
LA      1
BL      DU      DO

** Конец ввода геометрии
EG  1  0  0  0  0

** Возбуждение
FR  1  0      #freq
A1  0  1      1.0      0.0

** Вычисление ближнего поля для апертуры, и дальние поля и запись их в файл
DA  1  1      1  0  0

** Плоскости с постоянной x
FE  3  1 #Ny #Nz 0      #xneg #ystart #zstart      #xskip #yskip #zskip
FE  3  1 #Ny #Nz 0      #xpos #ystart #zstart      #xskip #yskip #zskip

** Плоскости с постоянным y
FE  3  #Nx 1 #Nz 0      #xstart - #ypos #zstart      #xskip #yskip #zskip
FE  3  #Nx 1 #Nz 0      #xstart #ypos #zstart      #xskip #yskip #zskip

** Плоскости при постоянном z
FE  3  #Nx #Ny 1 0      #xstart #ystart - #zpos      #xskip #yskip #zskip
FE  3  #Nx #Ny 1 0      #xstart #ystart #zpos      #xskip #yskip #zskip

** Чтобы рассчитать фазовый центр, рассчитаем ближнее поле спереди рупорной антенны
** (в области дальнего поля, от 20m до 30m, или около от 100 до 150 длин волн)
**FE  1  101  1  1  0  20/#sf  0  0  0.1/#sf  0  0

** Окончательно мы рассчитаем ДН дальнего поля по отношению к фазовому центру
OF  1  0      -0.216/#sf  0  0
FF  1  37  73  0  0      0  5  5
** Конец
EN

```

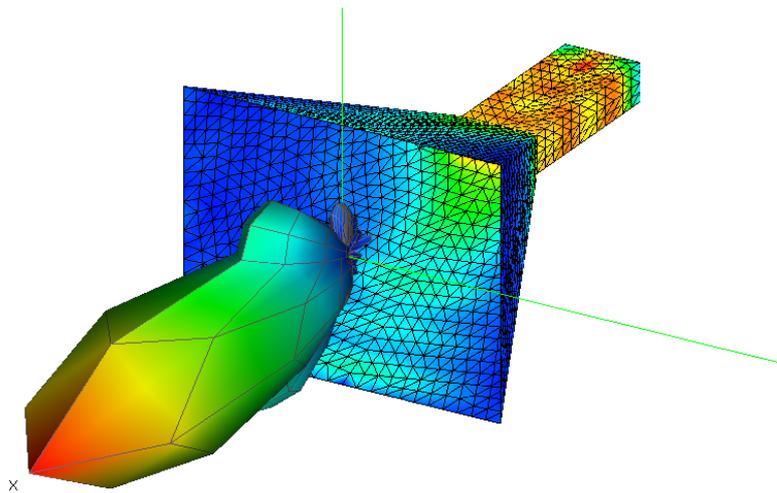


Рис. 10.9. Рупорная антенна и токи на ее металлических стенках, а также ДН излучения

Приведем карты, которые используются для схема данных поля. На рис. 10.10 приведем опции карты FE и линию, которая записывается в тексте программы.

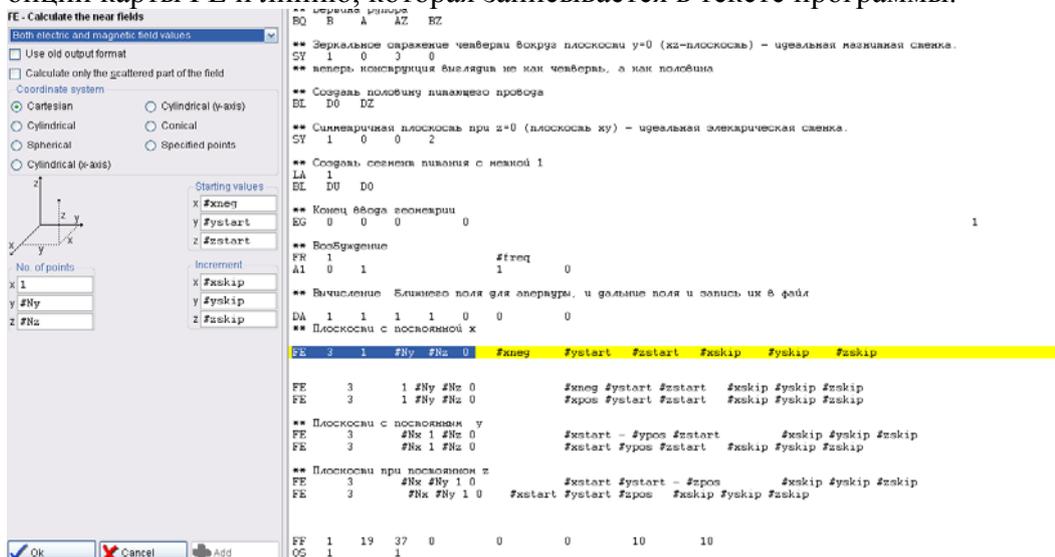


Рис. 10.11. Вывод рассчитанного ближнего поля в плоскости (и электрические и магнитные поля)

После расчета, в программе POSTFEKO, на этапе постобработки, мы можем видеть поля на плоскостях, окружающих рупорную антенну (рис. 10.12).

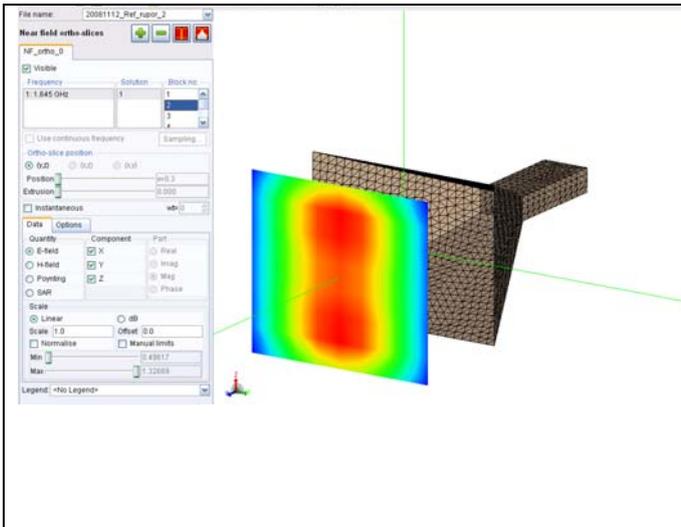


Рис. 10.12. Ближнее поле в плоскости, перпендикулярной направлению излучения рупорной антенны

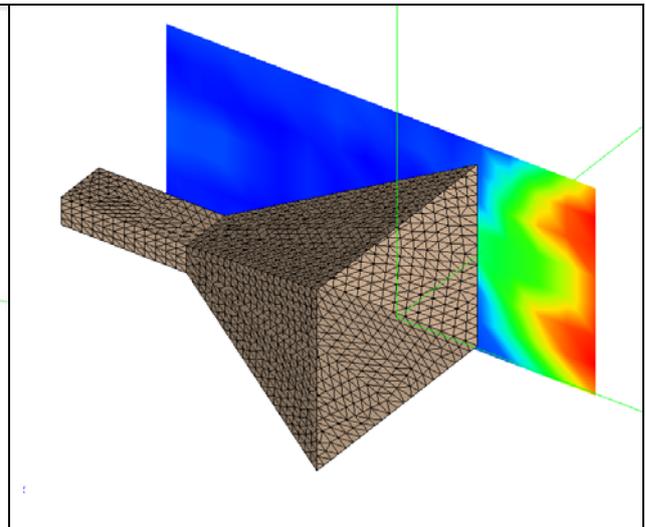
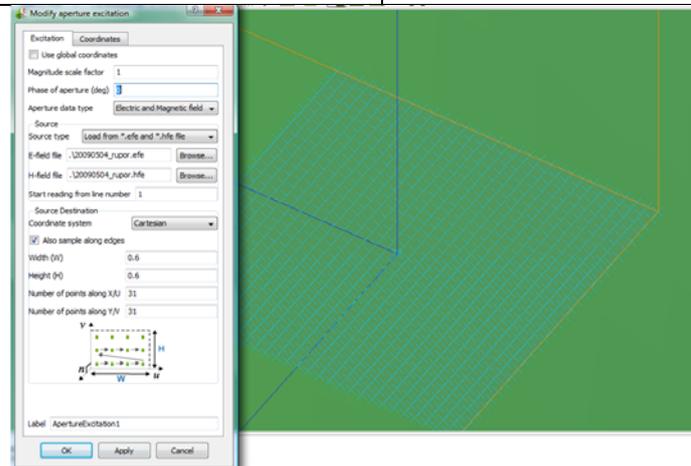


Рис. 10.13. Ближнее поле в плоскости, окружающей рупорную антенну



Задание и сохранение ближнего поля в растре рупорной антенны (версия 5.4)

FE - Calculate the near fields

Electric field values

Use old output format

Calculate only the scattered part of the field

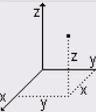
Coordinate system

Cartesian Cylindrical (y-axis)

Cylindrical Conical

Spherical Specified points

Cylindrical (x-axis)



No. of points

x 101

y 1

z 1

Starting values

x 20/#sf

y 0

z 0

Increment

x 0.1/#sf

y 0

z 0

```

** Создаем плоскость питающего провода
BL D0 DZ
** Симметричная плоскость при z=0 (плоскость xy) - идеальная электрическая стенка.
SY 1 0 0 2
** Создаем сегмент питания с межкой 1
LA 1
BL DU D0
** Конец ввода геометрии
EG 0 0 0 0
** Возбуждение
FR 1 #freq
A1 0 1 1 0
** Вычисление ближнего поля для апертуры, и дальние поля и запись их в файл
DA 1 1 1 1 0 0 0
** Плоскости с посювнойной x
FE 3 1 #Ny #Nz 0 #xneg #ystart #zstart #xskip #yskip #zskip
FE 3 1 #Ny #Nz 0 #xpos #ystart #zstart #xskip #yskip #zskip
** Плоскости с посювнойной y
FE 3 #Nx 1 #Nz 0 #xstart -#ypos #zstart #xskip #yskip #zskip
FE 3 #Nx 1 #Nz 0 #xstart #ypos #zstart #xskip #yskip #zskip
** Плоскости при посювнойной z
FE 3 #Nx #Ny 1 0 #xstart #ystart -#zpos #xskip #yskip #zskip
FE 3 #Nx #Ny 1 0 #xstart #ystart #zpos #xskip #yskip #zskip
** Чтобы рассчитать фазовый центр, мы рассчитаем ближнее поле спереди рупорной антенны
** (в области дальнего поля, от 20m до 30m, или около от 100 до150 длин волн)
**FE 1 101 1 1 0 20/#sf 0 0 0.1/#sf 0 0
** Окончательно мы рассчитаем ДН дальнего поля по отношению к фазовому центру
OF 1 0 -0.216/#sf 0 0
FF 1 37 73 0 0 0 5 5
FF 1 19 37 0 0 0 10 10
OS 1 1

```

Рис. 10.14. Задание плоскости, в которой будет рассчитано ближнее электрическое поле

** Чтобы рассчитать фазовый центр рупорной антенны, рассчитаем ближнее поле по линии перед рупорной антенной (в области дальнего поля, от 20m до 30m, или от 100 до150 длин волн)

**FE 1 101 1 1 0 20/#sf 0 0 0.1/#sf 0 0

** Окончательно мы рассчитаем ДН дальнего поля по отношению к фазовому центру

OF 1 0 -0.216/#sf 0 0

FF 1 37 73 0 0 0 5 5

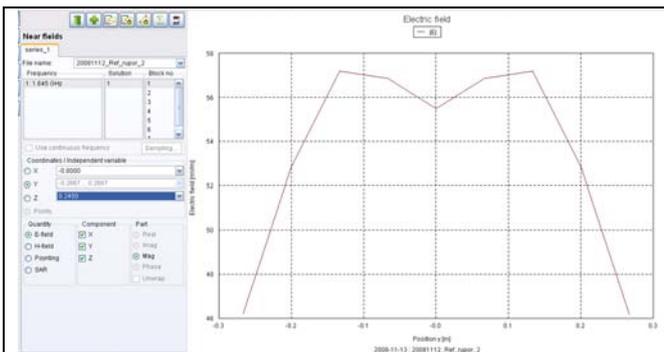


Рис. 10.15. Распределение ближнего поля вдоль координаты y

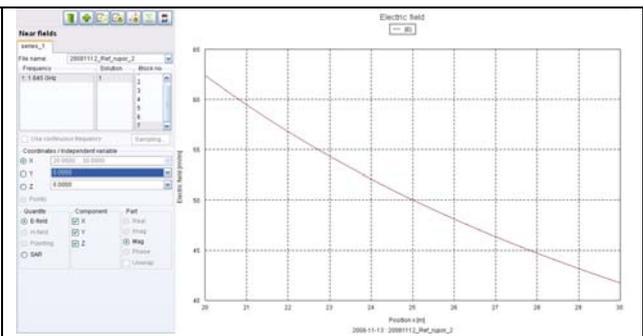


Рис. 10.16. Распределение ближнего поля вдоль координаты x

В 7-м дополнительном блоке данных: смещение фазового центра равно -0.216 м(это можно видеть в файле *.out).

Полученный файл с расширением **.ffe** (дальние поля) имеет вид:

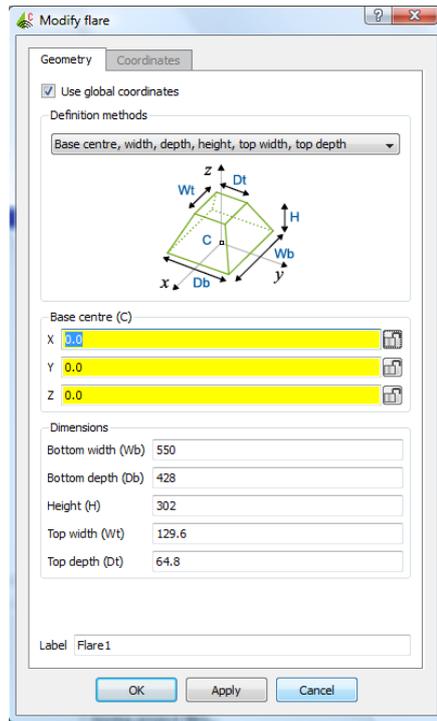
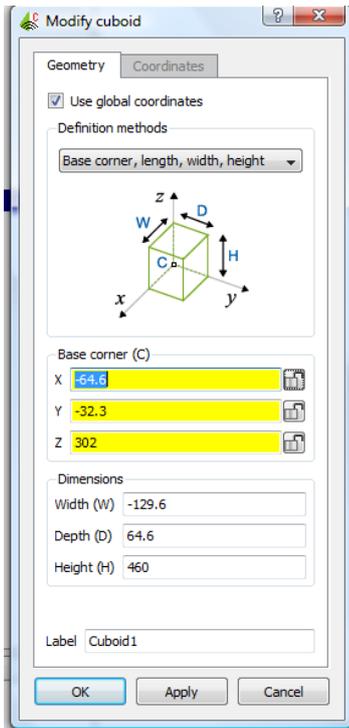
0.00000000E+000 0.00000000E+000 (-1.07250299E-001,-5.54661171E-002) (-1.43086211E-016,-6.20906610E-017) -3.26571381E+000 -3.01041799E+002 -3.26571381E+000
1.00000000E+001 0.00000000E+000 (3.06869751E-002,-1.22360941E-001) (-4.36875689E-017,-3.38205640E-017) -2.88526237E+000 -3.10056563E+002 -2.88526237E+000
2.00000000E+001 0.00000000E+000 (1.14533101E-001,-1.32074848E-002) (-1.74975137E-016,-8.86569769E-017) -3.66703481E+000 -2.99051086E+002 -3.66703481E+000
3.00000000E+001 0.00000000E+000 (4.08599324E-002, 2.32206643E-002) (-2.46975184E-016, 1.34755715E-016) -1.14615932E+001 -2.95918196E+002 -1.14615932E+001
4.00000000E+001 0.00000000E+000 (1.33865912E-001,-8.03440449E-002) (2.34140001E-016, 2.24595289E-017) -1.03353557E+000 -2.97473736E+002 -1.03353557E+000
5.00000000E+001 0.00000000E+000 (3.61487820E-001, 3.91990612E-002) (-5.04281497E-016, 3.79235807E-016) 6.30961741E+000 -2.88902890E+002 6.30961741E+000
6.00000000E+001 0.00000000E+000 (3.76244204E-001, 1.94080880E-001) (-3.35682723E-017,-6.82419888E-016) 7.63101053E+000 -2.88211497E+002 7.63101053E+000
7.00000000E+001 0.00000000E+000 (4.24891818E-001,-5.61731087E-002) (4.98416246E-016,-5.16827533E-016) 7.73779310E+000 -2.87780491E+002 7.73779310E+000

Файл с расширением **.efe** (ближнее электрическое поле)

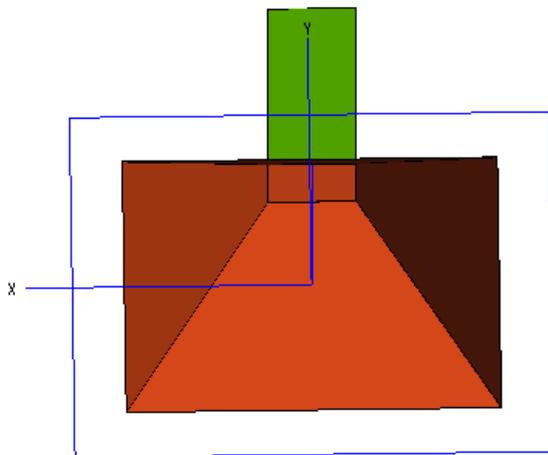
-8.00000000E-001 -2.66666667E-001 -2.45000000E-001 (-6.55753404E-003,-4.76791137E-003) (-1.48306555E-002,-5.10659647E-003) (3.17118779E-002,-2.85597598E-002)
-8.00000000E-001 -2.00000000E-001 -2.45000000E-001 (-5.31808889E-003,-9.29070421E-003) (-1.52317681E-002,-1.47926849E-002) (4.34852835E-002,-1.83205222E-002)
-8.00000000E-001 -1.33333333E-001 -2.45000000E-001 (-5.15030202E-004,-1.44365189E-002) (-1.03785431E-002,-1.93660159E-002) (4.93630219E-002,-1.18650409E-002)
-8.00000000E-001 -6.66666667E-002 -2.45000000E-001 (4.99706708E-003,-1.42353175E-002) (-4.69814427E-003,-1.37664963E-002) (5.20015081E-002,-9.39814547E-003)
-8.00000000E-001 0.00000000E+000 -2.45000000E-001 (6.94082872E-003,-1.25690908E-002) (2.13587711E-017,-2.72717249E-016) (5.28311974E-002,-8.95476843E-003)
-8.00000000E-001 6.66666667E-002 -2.45000000E-001 (4.99706708E-003,-1.42353175E-002) (4.69814427E-003, 1.37664963E-002) (5.20015081E-002,-9.39814547E-003)
-8.00000000E-001 1.33333333E-001 -2.45000000E-001 (-5.15030202E-004,-1.44365189E-002) (1.03785431E-002, 1.93660159E-002) (4.93630219E-002,-1.18650409E-002)
-8.00000000E-001 2.00000000E-001 -2.45000000E-001 (-5.31808889E-003,-9.29070421E-003) (1.52317681E-002, 1.47926849E-002) (4.34852835E-002,-1.83205222E-002)

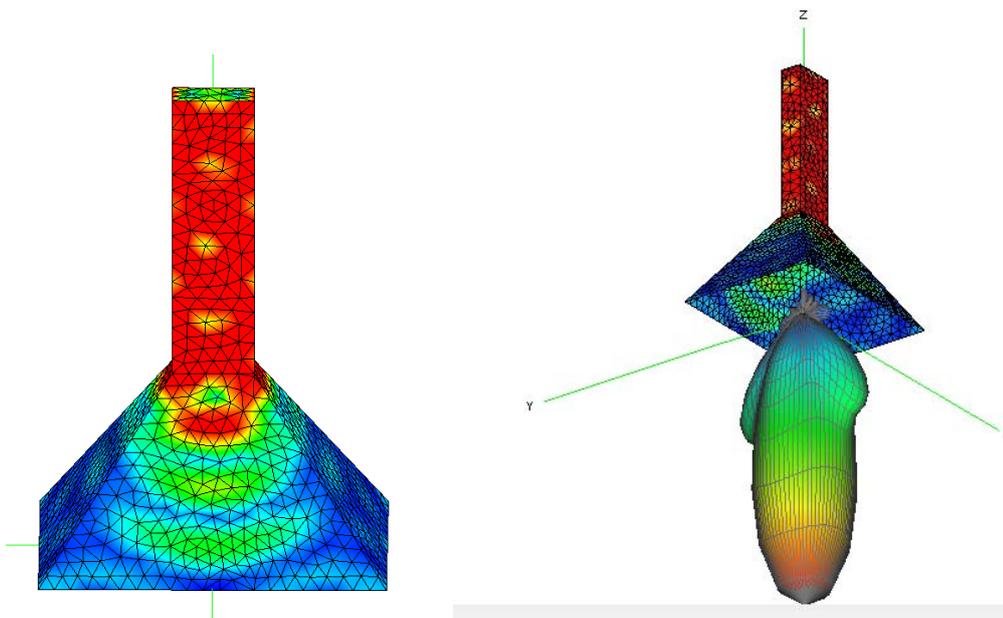
Полученный файл с расширением **.hfe** (ближнее магнитное поле)

-8.00000000E-001 -2.66666667E-001 -2.45000000E-001 (-2.75289251E-005, 1.20851092E-005) (8.73605433E-005,-7.58460351E-005) (3.02218009E-005, 9.76606614E-006)
-8.00000000E-001 -2.00000000E-001 -2.45000000E-001 (-2.18176527E-005,-4.20508687E-006) (1.26042165E-004,-3.75594825E-005) (3.54598548E-005, 3.12268648E-005)
-8.00000000E-001 -1.33333333E-001 -2.45000000E-001 (-1.27695629E-005,-7.10151175E-006) (1.28584286E-004,-3.63305347E-006) (2.94246084E-005, 4.24110632E-005)
-8.00000000E-001 -6.66666667E-002 -2.45000000E-001 (-6.49053452E-006,-4.63554792E-006) (1.14798539E-004, 2.50746927E-006) (1.69103578E-005, 3.25602557E-005)
-8.00000000E-001 0.00000000E+000 -2.45000000E-001 (2.70146453E-019,-4.43548053E-019) (1.08560029E-004,-1.44682549E-006) (3.92768489E-019, 3.16252953E-019)
-8.00000000E-001 6.66666667E-002 -2.45000000E-001 (6.49053452E-006, 4.63554792E-006) (1.14798539E-004, 2.50746927E-006) (-1.69103578E-005,-3.25602557E-005)



В последних, самых современных версиях FEKO, решить эту задачу можно проще, полностью описывая задачу в CADFEKO. Построение рупорной антенны в CADFEKO показано на рис.





Рупорная антенна, возбуждаемая волноводным портом (версия 5.4)

10.3. Замена рупорной антенны эквивалентной апертурой

Описание задачи в виде карт остается актуальным и в последних версиях FEKO. Поэтому продолжим рассмотрение задачи в картах. Рассчитанные в предыдущем разделе файлы используются в виде эквивалентной антенны. Они задают эквивалентную апертуру. Эта апертура используется для возбуждения параболического отражателя. Создадим в EDITFEKO следующий файл:

```
IN 0 "example_35.inc" ** Включение переменных из ранее созданного файла
```

```
** Установим опции разбиения рефлектора (сохраним параметры разбиения сегмента)
```

```
IP #seg_rad #ref_tri #seg_l
```

```
** используем метку 2, чтобы определить рефлектор, рассчитываемый PO
```

```
LA 2
```

```
** Определим точки – сторону рефлектора в отрицательном направлении X
```

```
DP R1 #focal 0.0 0.0
```

```
DP R2 #focal/2 0.0 0.0
```

```
DP R3 #focal 0.0 #ref_rad
```

```
DP R4 #ref_rim 0.0 #ref_rad
```

```
PB R1 R2 R3 R4 90.0 #ref_tri
```

```
** Отразить четверть в плоскости y=0 (xz-плоскость, идеальная магнитная стенка)
```

```
** И плоскость z=0 (плоскость xy, идеальная электрическая стенка) одновременно
```

SY 1 0 3 2

** Применим метод физической оптики РО к рефлектору

PO 2 1 0 0 0

** Определить точки угла для этих шести апертур

DP A1 #xneg - #ypos - #zpos

DP A2 #xpos - #ypos - #zpos

DP A3 #xneg #ypos - #zpos

DP A4 #xpos #ypos - #zpos

DP A5 #xneg - #ypos #zpos

DP A6 #xpos - #ypos #zpos

DP A7 #xneg #ypos #zpos

** Конец геометрического входа.

EG 1 0 0 0 0

PS 0 0 10

** Возбуждение

FR 1 0 #freq

** Определение апертуры, которая заменяет рупор. Отметим, что две координаты апертуры должны идти в порядке x, y, z (любые два из них, в зависимости от направления апертуры; и нормаль в направлении положительной оси. (Это - порядок отсчетов данных в файл ближнего поля.)

** На некоторых поверхностях это ведет к нормальям, идущей внутрь, принимая во внимание, что поверхность эквивалентных источников требует нормалей, направляющих направленный наружу. Это исправляется прибавлением фазы 180° к этим апертурам. (Эффективно изменение нормальный вектор.)

** заметить также, что все знаки - символы находятся в том же самом файле.

** Чтобы включать данные конкретной апертуры, увеличиваем переменную #start

** С размером каждой апертуры, чтобы указать начало следующих данных.

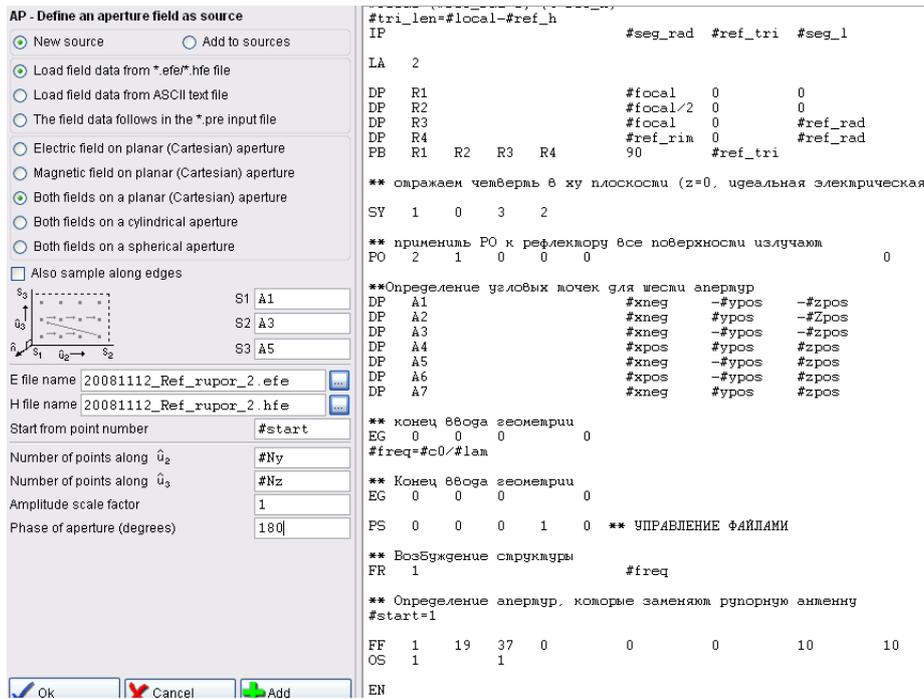


Рис. 10.19. Карта описания апертуры как поля источника

```

** Плоскость при x = #xneg (нормаль показывает внутрь)
#start = 1
AP 1 -5 A1 A3 A5 #start #Ny #Nz 1.0 180.0 ...
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"

** Плоскость при x = #xpos
#start = #start + #Ny*#Nz
AP 1 -5 A2 A4 A6 #start #Ny #Nz 1.0 0.0 ...
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"

** Плоскость при y = -#ypos
#start = #start + #Ny*#Nz
AP 1 -5 A1 A2 A5 #start #Nx #Nz 1.0 0.0 ...
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"

** Плоскость y = #ypos (нормаль указывает внутрь)
#start = #start + #Nx*#Nz
AP 1 -5 A3 A4 A7 #start #Nx #Nz 1.0 180.0 ...
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"

** Плоскость при z = -#zpos
#start = #start + #Nx*#Nz
AP 1 -5 A1 A2 A3 #start #Nx #Ny 1.0 180.0 ...
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"

** Плоскость при z = #zpos
#start = #start + #Nx*#Ny

```

```
AP 1 -5 A5 A6 A7 #start #Nx #Ny 1.0 0.0 ...
```

```
"Example_35a.efe" "example_35a.hfe"
```

```
** Вычислить дальние поля в перпендикулярных плоскостях
```

```
** Вертикальное сечение
```

```
FF 1 181 1 0 0.0 180.0 1.0
```

```
** Горизонтальное сечение ДН
```

```
FF 1 1 361 0 90.0 0.0 1.0
```

```
** Конец модели
```

```
** Оба из них читают критические размеры из файла example_35in.prc так, что параметры модели можно изменять в одном месте:
```

```
** Масштабирование. Все координаты введены в мм и масштабируются с помощью карты #sf к метрам
```

```
** Позиции поля также масштабируются.
```

```
#sf = 0.001
```

```
** Умножим размеры на этот коэффициент, чтобы получить метры
```

```
** Масштабирование
```

```
SF 1 #sf
```

```
** Частота, длина волны и сегментация
```

```
#freq = 1.645E9
```

```
** Частота в Герц
```

```
#lam = (#c0/#freq)/#sf
```

```
** Длина волны в мм (координаты перед
```

```
масштабированием)
```

```
#seg_l = #lam/15
```

```
** Максимальная длина сегмента
```

```
#tri_l = #lam/7
```

```
** Максимальная длина ребра треугольника
```

```
#seg_rad = 1.0
```

```
** радиус сегмента
```

```
** Сегментация объекта
```

```
IP #seg_rad #tri_l #seg_l
```

```
** Волновод и параметры рупора - размеры в мм
```

```
#horn_w = 550.0
```

```
** Ширина рупора (параллельный оси Y)
```

```
#horn_h = 428.0
```

```
** Высота рупора (параллельный оси Z)
```

```
#horn_l = 460.0
```

```
** Длина (по оси X) сечения рупора
```

```
#wg_w = 129.6
```

```
** Ширина волновода
```

```
#wg_h = 64.8
```

```
** Высота волновода
```

```
#wg_l = 302.0
```

```
** Длина отрезка волновода.
```

```
#feedsep = 46.0
```

```
** Расстояние между задней стенкой и штырьком питания
```

```
** Полученные параметры
```

```
#xback = - #wg_l - #horn_l
```

```
** x-координата задней стенки
```

```
#xfeed = #xback + #feedsep
```

```
** x-координата в точке питания
```

```
** Апертурные параметры
```

```
#xpos = 30.0
```

```
** x-координата плоскости при положительных x
```

```
#xneg = -800.0      ** x-координата плоскости при отрицательных x
#ypos = 300.0      ** y-координата плоскости при положительных y
#zpos = 280.0      ** z-координата плоскости при положительных z
#sample = #lam/2.5 ** Выборки, задающие плотность на апертуре
```

```
** Полученные параметры
#Nx = CEIL((#xpos-#xneg)/#sample)
#xskip = (#xpos-#xneg)/#Nx
#xstart = #xneg + #xskip/2
#Ny = CEIL(2*#ypos/#sample)
#yskip = 2*#ypos/#Ny
#ystart = - #ypos + #yskip/2
#Nz = CEIL(2*#zpos/#sample)
#zskip = 2*#zpos/#Nz
#zstart = - #zpos + #zskip/2
```

```
** Параметры рефлектора
#ref_rad = 6*#lam      ** Радиус параболического отражателя
#ref_h = #lam          ** Высота параболического отражателя
#ref_tri = #lam/4      ** Установка более крупного разбиения на рефлекторе
```

```
** Рассчитанные параметры
#focal = (#ref_rad^2) / (4*#ref_h)      ** Фокусное расстояние
#ref_rim = #focal - #ref_h              ** x-координата передней периферии рефлектора
```

Третья модель (example_35c.pre) создана для сравнения. Эта модель содержит и рупор МоМ и РО рефлектор. Связь между объектами МоМ и объектами РО не учитывается. Использование апертуры заменяет 4072 базовые функции рупора 2128 точечными диполями.

Это значительно уменьшает время, требуемое, чтобы вычислить токи РО на рефлекторе (с 112 до 39 секунд на 500MHz, Pentium III) . Для более сложной модели питания эффект будет даже больший. На рис. 10.17 и 10.18 сравниваются ДН, рассчитанные с заменой апертуры, которые рассчитаны гибридным методом МоМ и РО.

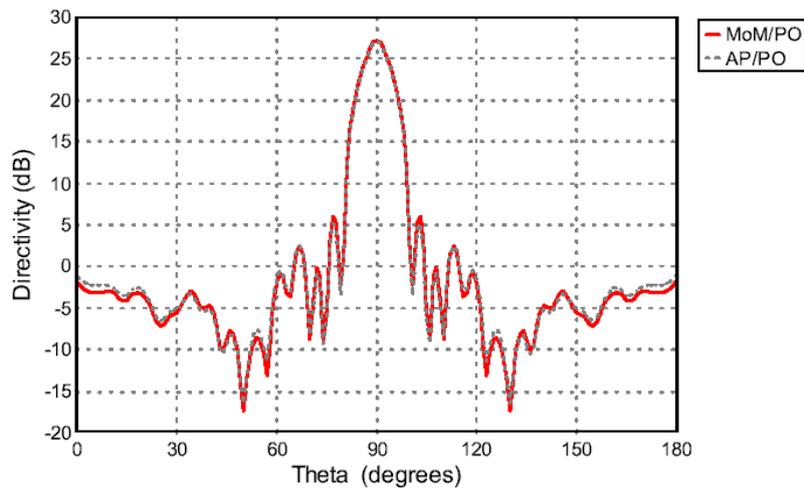


Рис. 10.17. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости, рассчитанные разными методами

Можно также вычислять ближнее поле на сферической поверхности вокруг рупора (используя карту OF, чтобы задать фазовый центр как начало локальной системы координат) и использовать одиночную сферическую апертуру. Это может требовать большего количества вибраторов (на 612 больше диполей, если требуется того же самого максимального разнесения и того же самой близкой точки к рупору), но намного более простой установить.

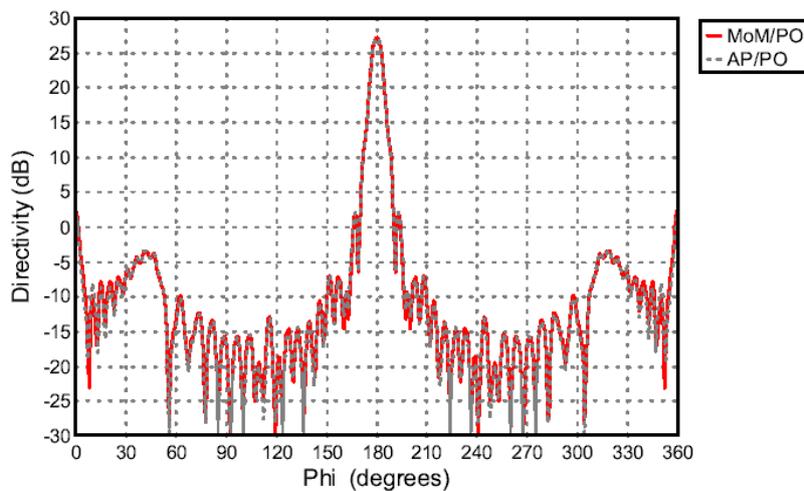


Рис. 10.18. Диаграмма направленности дальнего поля в горизонтальной плоскости, рассчитанные разными методами

Можно также заменить рупорную антенну используя ее ДН в дальнем поле. ДН также рассчитывается в примере `example_35a.pre` и затем используется, с помощью карты AR, в примере `example_35d.pre`.

Фазовый центр – это точка сферы, которая эквивалентна нашей антенны с точки зрения дальнего поля. Рупорная антенна излучает вперед с другим фазовым углом, чем назад. Вот если мы найдем точку, в которую, если мы поместим антенну, она будет излучать с одинаковым фазовым углом, то это и будет фазовый центр антенны.

Рассмотрим фазу компоненты в дальнем поле.

При изменении Φ фаза изменяется незначительно.

Но имеется такая проблема: качество разбиения значительно влияет на абсолютное значение фазы.

Длина волны с частотой 1.57 ГГц равна 19.1 см. Делим на 2/360. Получаем 1 мм. Изменение фазового центра в диапазоне углов места от 0 до 60 град.

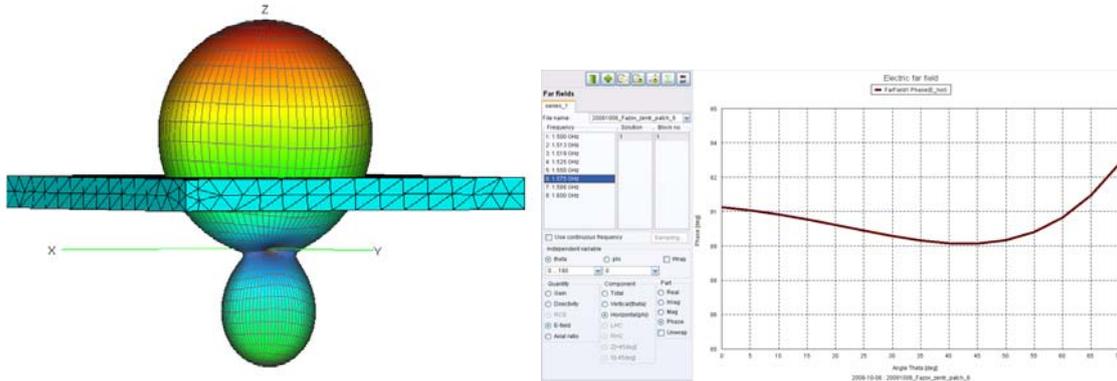


Рис. 10.20. Пример определения фазового центра пач-антенны на подложке

** Example_35 рассматривает рупорную антенну, стоящую перед параболическим зеркалом.

** Включаем в проект переменные, а также масштабы из файла, который создан ранее IN 0 "example_35.inc"

** Создание четверти рефлектора

** Параметры разбиения рефлектора на треугольники (установка сегментации)

IP #seg_rad #ref_tri #seg_l

** Использование метки 2 для спецификации рефлектора для расчета PO

LA 2

** Задание точке – фаски рефлектора в отрицательном направлении по оси x

DP R1 #focal 0 0

DP R2 #focal/2 0 0

DP R3 #focal 0 #ref_rad

DP R4 #ref_rim 0 #ref_rad

PB R1 R2 R3 R4 90 #ref_tri

** Зеркало в плоскости $y=0$ (xz-plane, идеальная магнитная стенка)

** и плоскости $z=0$ (xy-plane, идеальная электрическая стенка)

SY 1 0 3 2

** Описание рефлектора, рассчитываемого методом PO

PO 2 1 0 0 0

** Конец ввода геометрии

EG 1 0 0 0 0

** Возбуждение

FR 1 0 #freq

** Использование рассчитанной ДН в качестве возбуждения

** Заметим, что точечный источник должен быть установлен в фазовом центре, используемом в расчете дальнего поля. В этом случае он расположен на 216 мм внутри горловины рупорной антенны.

AR 0 1 1 37 73 1 0 -0.216/#sf 0 0 ...

```

0 0 0 "example_35a.ffe"
** Расчет ДН в сечениях
** Вертикальное сечение
FF 1 361 1 0 0 180 0.5
** Горизонтальное сечение
FF 1 1 721 0 90 0 0.5
** End
EN

```

При использовании карты AR, антенна заменяется точечным источником с заданной диаграммой направленности. Важно, что точечный источник располагается в фазовом центре антенны, что можно выполнить, если ДН дальнего поля относится к тому же самому фазовому центру.

Фазовый центр антенны можно найти, используя тот факт, что электрическое дальнее поле антенны будет спадать по закону $1/r$ и принимая, что начало координат этого спада будет фазовым центром антенны. Таким образом, если инвертируете ближнее поле, расширяя линейный предел этой линии к её пересечению, то расстояние пересечения с осью даст фазовый центр антенны в системе координат, в которых было рассчитано ближнее поле. Для рупорной антенны, с учетом симметрии, что фазовый центр должен быть на x оси.

Чтобы найти фазовый центр рупорной антенны, вычислим ближнее поле по оси x перед антенной от 20 м. до 30 м. (Это - приблизительно от 100 до 150 длин волны - если мы не получаем непротиворечивый результат, мы должны увеличить расстояние – см. ниже.). Затем мы чертим значение электрического поля как функция расстояния (x) в POSTFEKO и выполняем инверсию, используя кнопку *Perform calculations from series*.

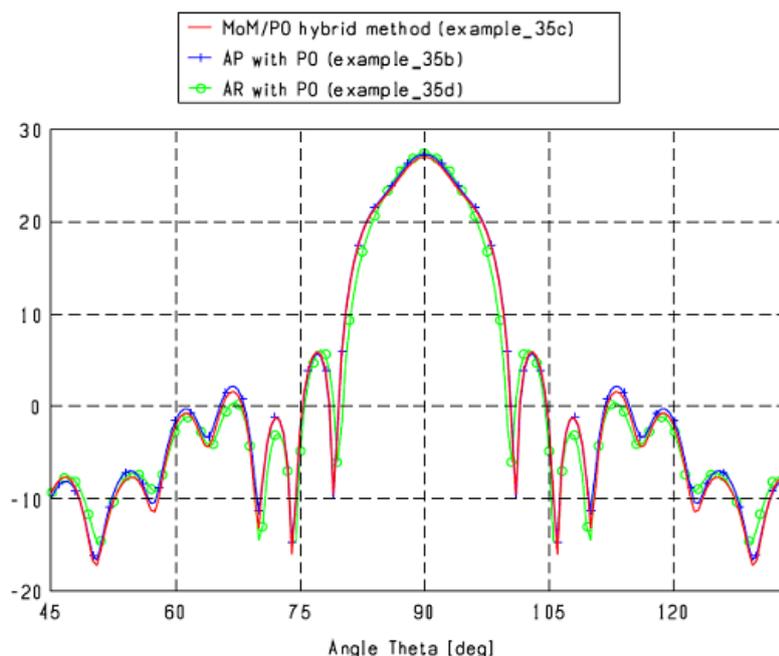
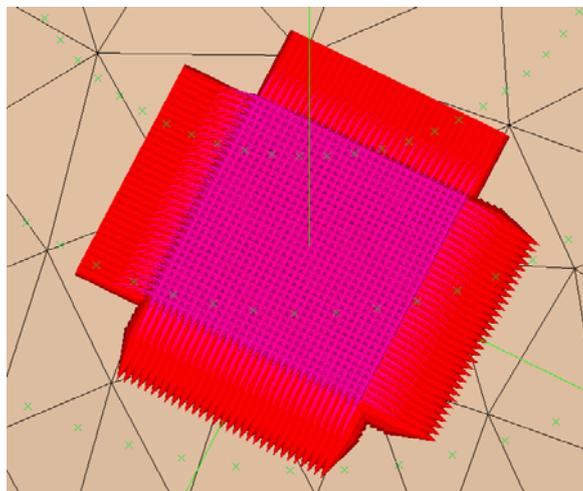


Рис. 10.21. Сечение диаграммы направленности в вертикальной плоскости

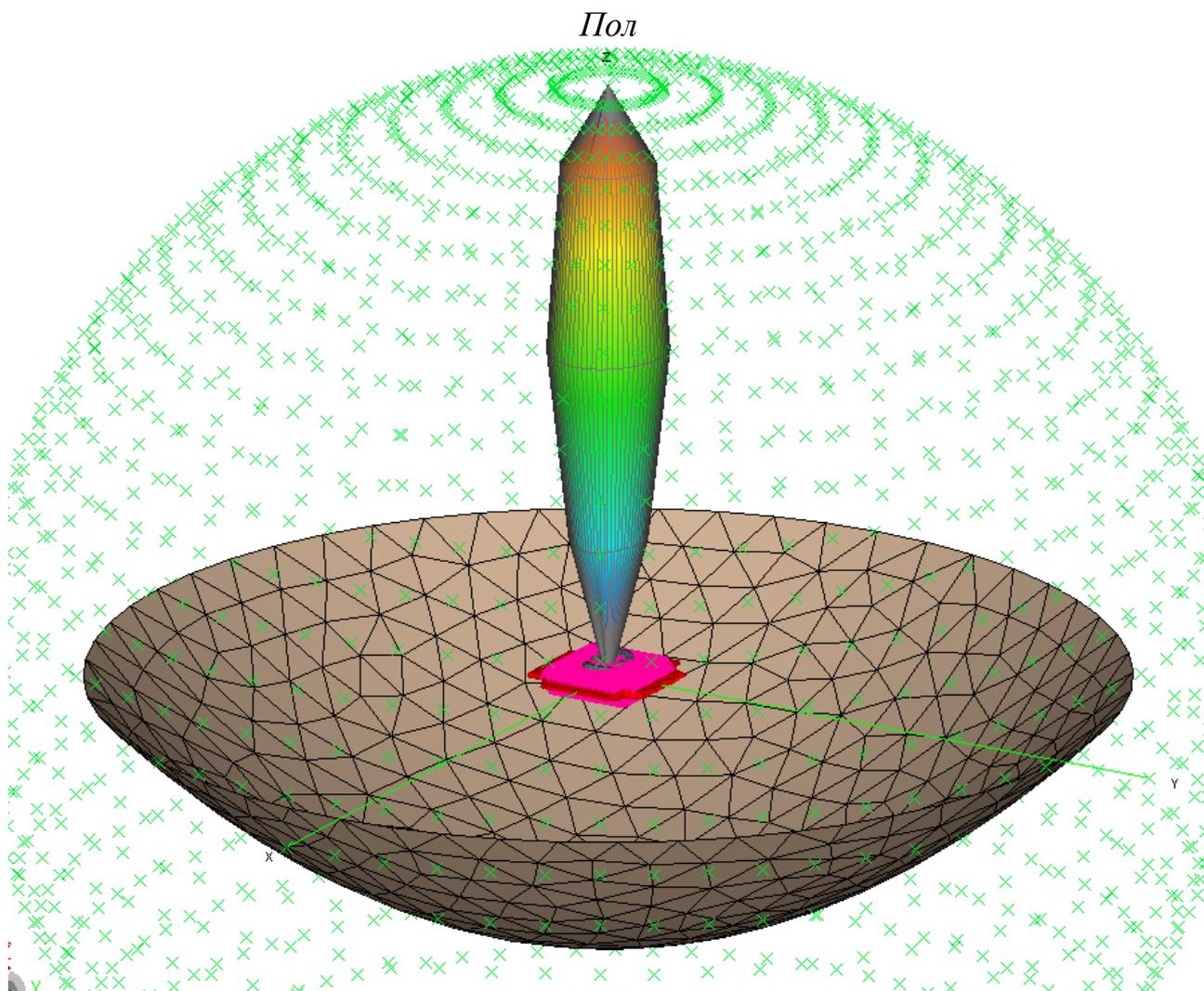
Выражение $1/\#series$ 1, используется, чтобы получить результат, который должен быть на оси x , с некоторым смещением. Переключите на закладку Series 2. Из таблицы в этой закладке может быть замечено, что инверсия при 20m равна 16.0270, и в 30m это равно 23.9548. Падение этой линии определяется разностью между этими числами, разделенными на шаг (здесь $7.9278/10 = 0.79278$). Следующий шаг должен установить инвертированное значение ближнего поля при $x=0$. Из элементарной математики, известно, что пересечение оси (c) может быть определено из уравнения $c = y - tx$, где t – наклон линии. Это используется для расчета точки пересечения в начале линии, и в конце. Эти две величины пересечения осей равны 0.1714 и 0.1714 соответственно. Эти два числа должны быть относительно близки друг к другу.

Если эта разность слишком большая, результат не непротиворечив, и мы должны увеличить расстояние от антенны (то есть мы тогда не находимся в области, где поле спадает по закону $1/r$). Эта величина $C = 0.1714$ – величина на левой оси, где $x = 0$, и результат деления его на наклон m , приводит к отрицательному расстоянию от начала координат до фазового центра. Это дает величину $c/m = -0.216$ метра.

Расчет фазового центра по результатам дальнего поля – дает почти то же значение, но использует более точный метод (см. рис. 10.18 - рефлектор находится внутри области дальнего поля $2D^2/\lambda$ для рупора, так что нужно ожидать приблизительно те же результаты при использовании аппроксимации источника поля в дальней зоне), но время расчета уменьшается от 8.3 секунд до меньше, чем 0.1 секунд.



Ближнее поле в растре рупорной антенны, используемое как вторичный источник

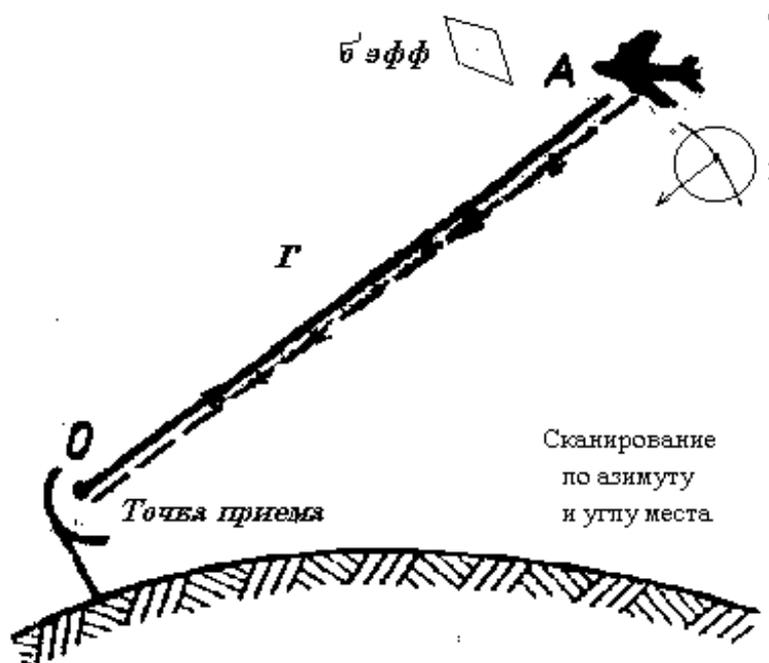


Криволинейную поверхность можно описать только методом физической оптики. (методы UTD – только для плоскостей или набора плоскостей)

11. Расчет эффективной площади рассеяния ракеты

Рассчитаем эффективную площадь рассеяния ракеты, состоящей из диэлектрического конуса и металлического цилиндра. Расчет выполним для плоской волны радиолокатора, падающего под разными углами по направлению к летящей ракете.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) тесно связана с максимальной дальностью радиолокации.



Уравнение радиолокации:

Мощность, принятая от отраженной цели, равна:

$$P_n = \frac{\sigma P G_m A_{эфф} F^4(\theta, \varphi)}{(4\pi r^2)^2}$$

(11.1),

где

P – мощность, излучаемая передатчиком,

G_m – коэффициент усиления антенны, или коэффициент направленного действия в направлении

направлении

направлении

направлении

направлении

Рис. 11. 1. Схема радиолокации цели

излучаемой мощности, $F(\theta, \varphi)$ – нормированная характеристика направленности при $F(0, 0)=1$,

σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели – есть отношение мощности ненаправленного излучателя (в точке цели), создающего в месте приема такую же плотность мощности S_o , как и реальная цель, к плотности мощности S_y радиолокатора в месте расположения цели, $\sigma_y \sim \frac{S_o}{S_y}$. Эта характеристика имеет размерность площади.

Мощность вторичного ненаправленного излучателя равна σS_y и создает в точке приема такую же мощность, как и цель, т.е.

$$S_n = \frac{\sigma S_y}{4\pi r^2} \quad (11.2)$$

Отсюда ЭПР цели равна $\sigma = 4\pi r^2 S_n / S_u$. (11.3)

Падающая волна наводит токи на металле цели, которые формируют отраженную волну. ЭПР определяется геометрическим размером цели. Например, найдено, что для шара с радиусом a , $\sigma = \pi a^2$. Пусть $a = 5$ м. Тогда $\sigma = 75 \text{ м}^2$.

Вывод выражения (11.1). В месте расположения цели, плотность мощности равна

$$S_u = \frac{P G_m F^2(\theta, \varphi)}{4\pi r^2}.$$

Из определения σ имеем плотность мощности излучателя, отражающего от цели будет равна

$$S_n = \frac{\sigma S_u}{4\pi r^2}.$$

Мощность в точке нахождения антенны радиолокационной станции

$$P_n = A_{эфф} S_n = \frac{\sigma P G_m A_{эфф} F^2(\theta, \varphi)}{(4\pi r^2)^2},$$

где

$$A_{эфф} = A_{эфф.m} F^2(\theta, \varphi).$$

Полагая $P_n = P_{n.min}$ найдем максимально возможную дальность действия радиолокатора при совмещении излучения направления антенны на цель:

$$r_{max} = \sqrt[4]{\frac{P G_m A_{эфф.m} \sigma}{P_{n.min} (4\pi)^2}} \quad (11.4)$$

Используя известное соотношение для параболической антенны (без вывода)

$$A_{эфф.m} = \lambda^2 G / (4\pi) \quad (11.5),$$

Получаем максимальное расстояние обнаружения цели

$$r_{\max} = \sqrt[4]{\frac{PG_m^2 \lambda^2 \sigma}{P_{n.\min} 64\pi}} \quad (11.6)$$

Пример. При $P = 1$ МВт, $G_m = 10^4$ (или 40 дБ), $\lambda = 10$ см $\sigma = 1$ м³
 $P_{n.\min} = 10^{-13}$ Вт, получаем $r_{\max} = 270$ км.

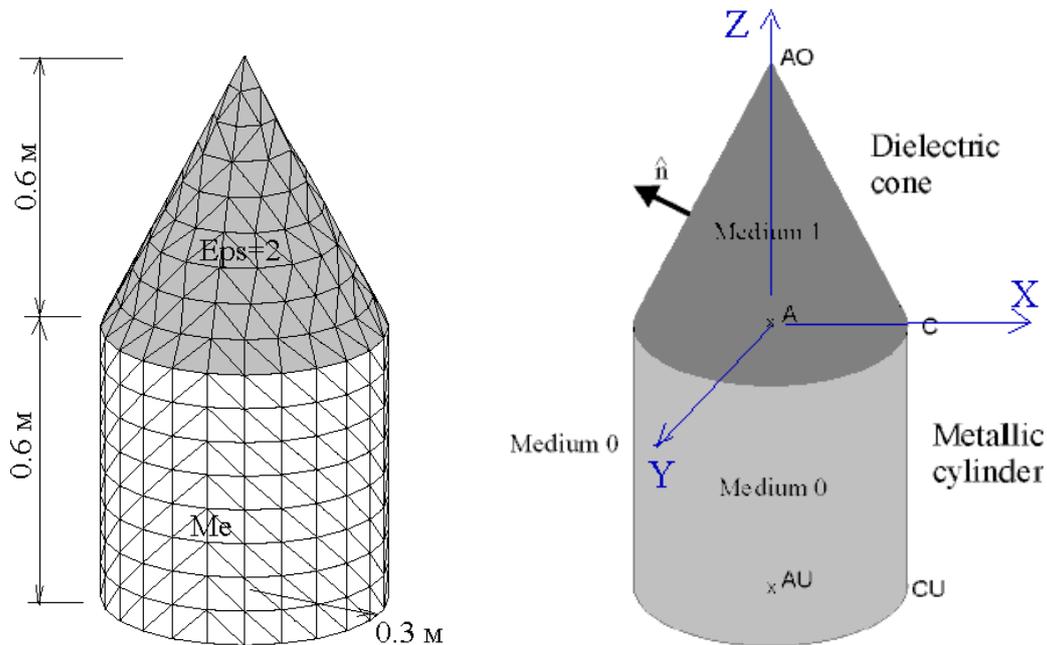


Рис. 11.2. Диэлектрический конус на металлическом цилиндре

Теперь найдем ЭПР цели, которая показана на рис. 11.2. Металлический цилиндр может рассматриваться, как заполненный воздухом.

Для решения этой задачи составляется следующий входной файл в EDITFEKO:

** Анализируемая структура состоит из диэлектрического конуса и металлического цилиндра. Металлический цилиндр заполнен воздухом (среда 0)

```
#lambda = 1.0          ** Длина волны
#a = 0.3*#lambda      ** Радиус цилиндра
#h = 0.6*#lambda      ** Высота цилиндра и конуса
#epsr = 2              ** Относит. диэлектрическая проницаемость
** Параметры сегментации
#tri_len = #lambda / sqrt(#epsr) / 9    **сторона треугольника
```

```
IP                      #tri_len
```

** Определение ключевых точек конструкции (рис. 11.2)

```

DP  A   0.0  0.0  0.0
DP  AO  0.0  0.0  #h
DP  AU  0.0  0.0  - #h
DP  C   #a   0.0  0.0
DP  CU  #a   0.0  - #h

```

** строим одну четверть геометрии - квадрант цилиндра и его дно.
 Треугольники находятся в воздухе (среда 0). Карту ME=0 можно не ставить.

```

ME  0                                     **среда - воздух
KR  AU  A   CU  90.0 #tri_len           ** круг внизу цилиндра
ZY  AU  A   CU  90.0 #tri_len

```

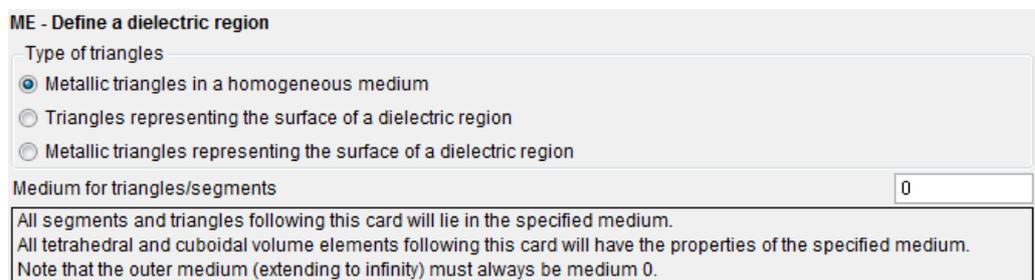


Рис. 11.3. Задание металлических треугольников в однородной среде

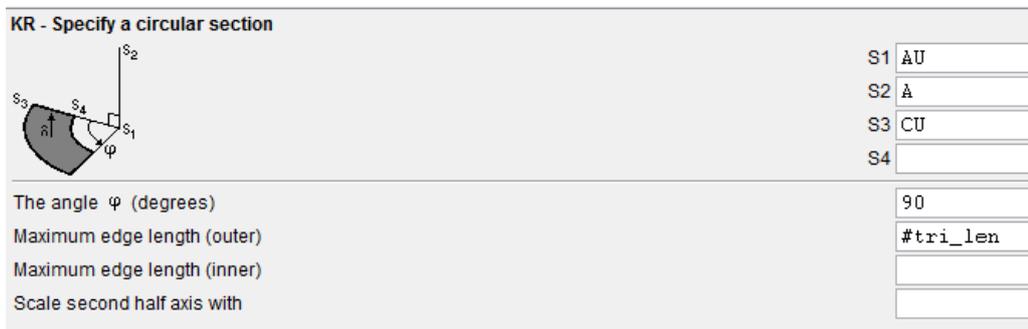


Рис. 11.4. Создание четверти круга, для закрытия цилиндра металлом снизу



Рис. 11.5. Создание поверхности цилиндра

После создания части структуры, её можно просмотреть в POSTFEKO (рис. 11.6).

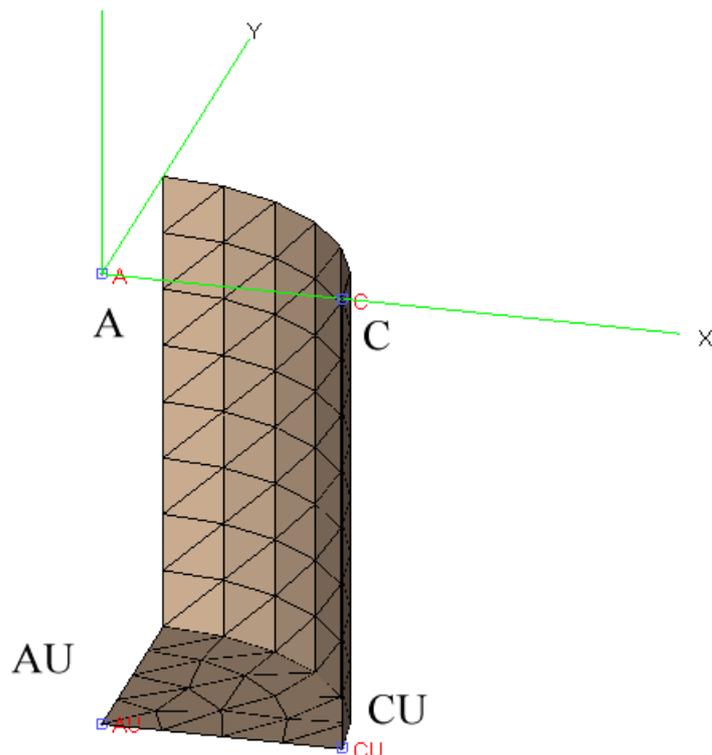


Рис. 11.6. Четверть металлического цилиндра

** теперь создадим диэлектрический конус и зададим разбиение на треугольники на поверхности диэлектрика. Это выполняется в карте ME (рис. 11.7).

ME - Define a dielectric region

Type of triangles

Metallic triangles in a homogeneous medium

Triangles representing the surface of a dielectric region

Metallic triangles representing the surface of a dielectric region

Medium A

Medium B

All segments below this card will lie in medium A. The triangles following this card represent the boundary between mediums A and B. Normal vectors of the triangles point from A to B.

All tetrahedral and cuboidal volume elements following this card will have the properties of medium A.

Note that the outer medium (extending to infinity) must always be medium 0.

Рис. 11.7. Параметры карты ME, описывающей диэлектрическую область

Тип треугольников:

- Металлические треугольники в однородной среде
- Треугольники, представляющие поверхность диэлектрической области.
- Металлические треугольники, представляющие поверхность диэлектрической области.

Поскольку диэлектрический конус моделируется как поверхность, эта поверхность имеет границу с двумя средами, здесь: диэлектрик и воздух. Т.к. воздух вне цилиндра всегда имеет среду 0, внутри цилиндра будет среда В, поскольку нормаль идет изнутри цилиндра к его внешней поверхности. Значит, среда А имеет метку 1.

Все сегменты ниже этой карты будут лежать в среде А. Треугольники, следующие за этой картой представляют границу между средой А и В.

Нормальные вектора этих треугольников указываются от А к В.

Все объемные элементы тетраэдров и кубоидов, следующие за этой картой, будут иметь свойства среды А.

Заметим, что внешняя среда (идущая до бесконечности) должна всегда быть средой 0.

```
ME 1 0 ** определение среды 1 и среды 0
KK A AO C 90.0 #tri_len #tri_len 0 ** в среде 1 строится диэл. Конус
```

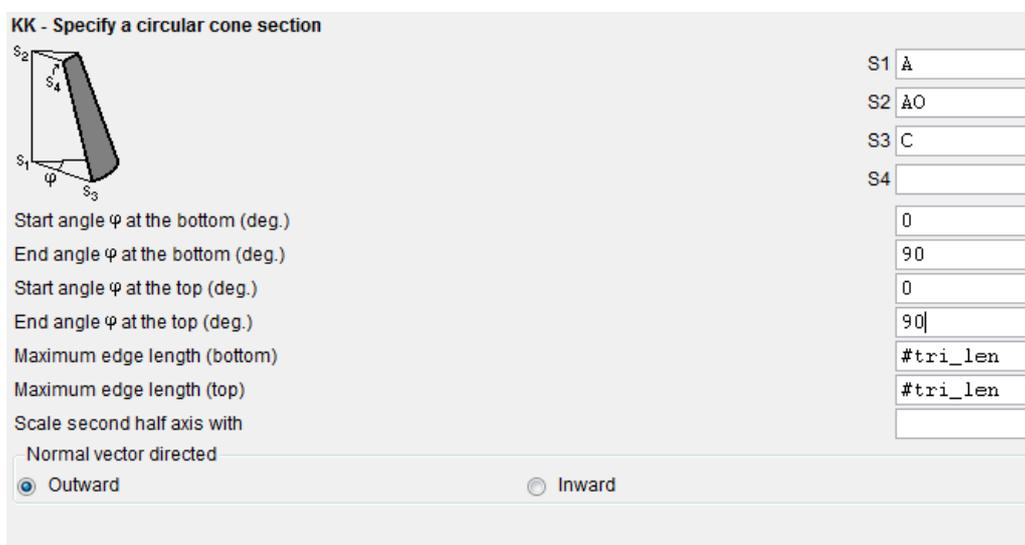


Рис. 11.8. Параметры карты поверхности конуса

Если после этого запустить задачу на расчет, то появится следующее сообщение, которое показывает, что диэлектрическое тело должно быть замкнуто:

```
File: 20080723_Konus_1
Processing the geometrical data for triangles
Checking the geometrical input data
WARNING 274: A dielectric body does not have a closed surface
See also message in the output file 20080723_Konus_1.out
ERROR 3849: Wrong specification of the medium for a metallic triangle
See also message in the output file 20080723_Konus_1.out
```

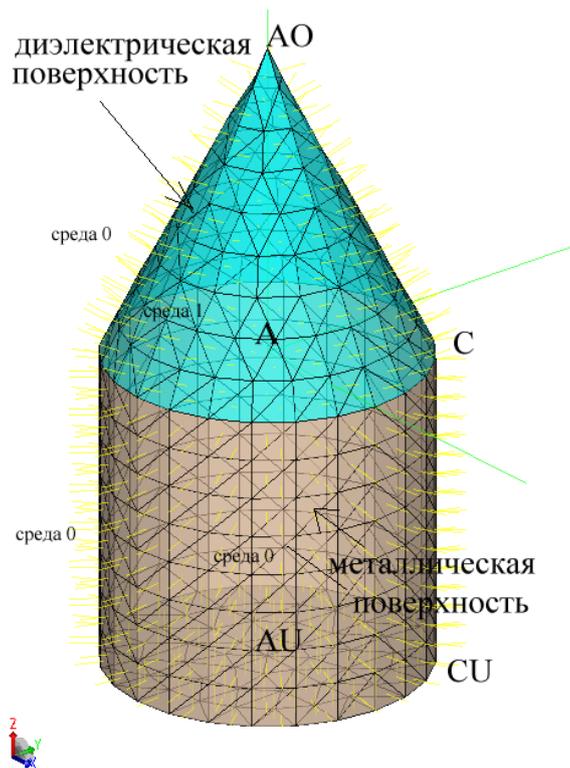


Рис. 11.9. Диэлектрический конус на металлическом цилиндре (сверху показано сообщение FEKO при неправильном черчении)

При введении симметрии структура рисуется полностью. Важно, что ориентация нормалей каждого элемента на дне идет внутрь.

** На нижнем основании конуса установим металлические треугольники на диэлектрической поверхности. Тогда нужно создать металлическую поверхность на поверхности диэлектрической области (потому, что нужно замкнуть металлический цилиндр).

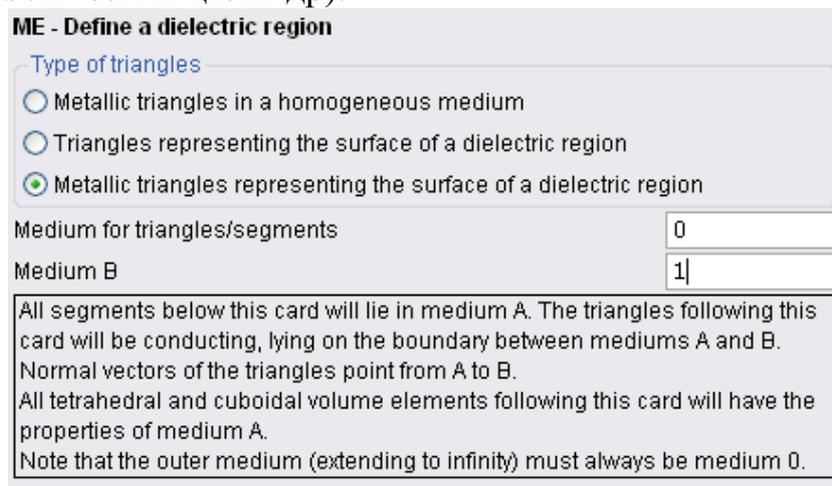


Рис. 11.10. Карта ME, в которой указываются свойства диэлектрической области. Режим металлических треугольников, представляющих собой поверхность диэлектрической области (среда A в диалоге здесь не указана)

Все сегменты ниже этой карты будут лежать в среде А. Треугольники, следующие за этой картой, будут проводящими, лежащими на границе между средой А и В. Нормальные вектора этих треугольников указываются от А к В. Все объемы тетраэдров и кубоидов, следующие за этой картой, будут иметь свойства среды А. Заметим, что внешняя среда (идущая до бесконечности) должна всегда быть средой 0.

ME 0 1 1 ** определ. среды 0, границы и среды диэл-ка
 KR A AO C 90.0 #tri_len **круг сверху цилиндра

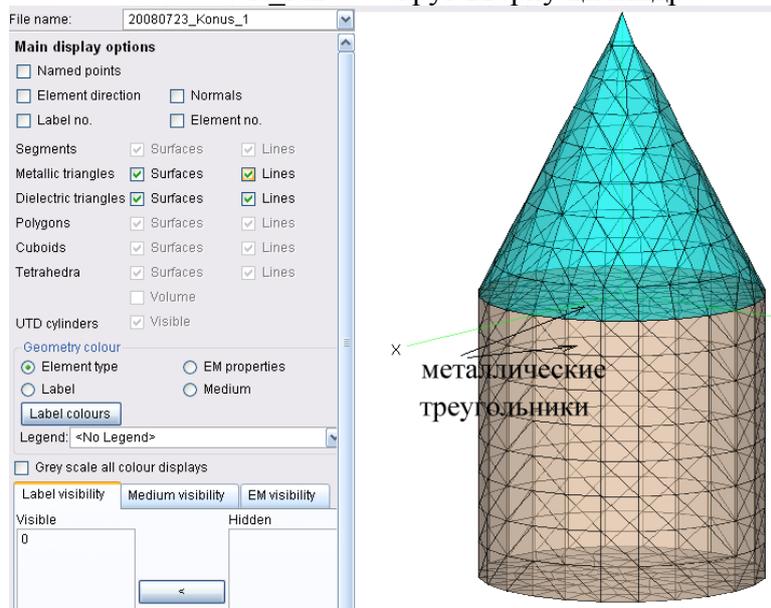


Рис. 11.11. Проверка свойств отдельных элементов в среде POSTFEKO

** Учет симметрии геометрии

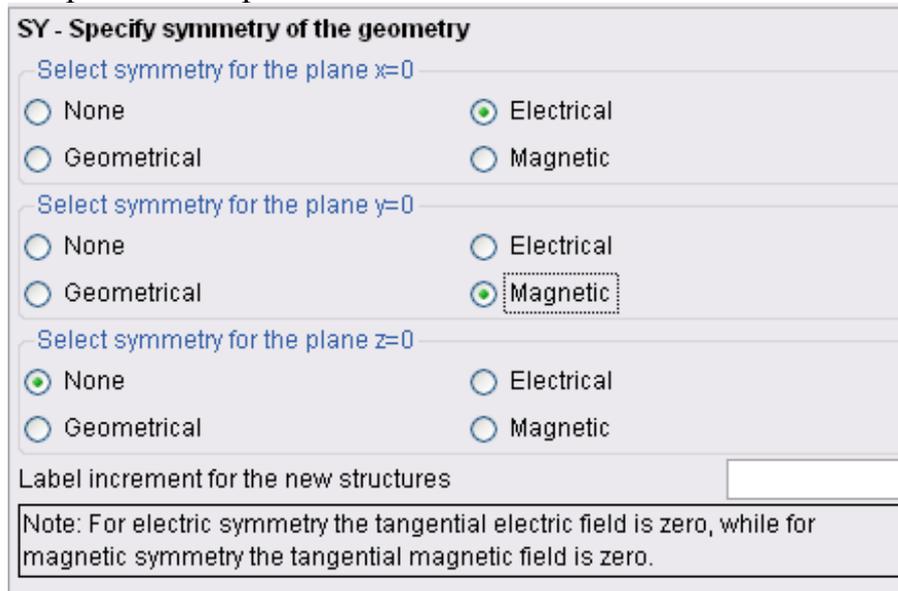


Рис. 11.12. Задание плоскости симметрии

SY 1 2 3 0
 ** Конец геометрии

EG 1 0 0 0 0

** Диэлектрические свойства

DI 1 #epsr 1.0 0.0

** Частота

#freq = #c0 / #lambda

FR 1 0 #freq

A0 - Specify plane wave incidence

New source Add to sources

Polarisation

Left hand rotating elliptical

Linear

Right hand rotating elliptical

Number of θ angles: 1

Number of φ angles: 1

Magnitude (V/m): 1

Phase (degrees): 0

Initial θ value (degrees): 0

Initial φ value (degrees): 0

Polarisation angle η (degrees): 0

Increment in θ (degrees):

Increment in φ (degrees):

Ellipticity (between 0 and 1):

Рис. 11.13. Задание источника плоских электромагнитных волн, падающих на конус

** Падающая плоская волна

A0 0 1 1 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0

** Расчет величины **Bistatic RCS** - эффективной площади рассеяния

FF - Calculate the far fields

Select field position

No calculation

Fields calculated as specified below

Fields calculated only in incident direction

Only integrate field over area given below

Calculate only the scattered part of the field

Directivity Gain

Number of θ points: 19

Number of φ points: 37

Initial θ : 0

Initial φ : 0

θ increment: 10

φ increment: 10

Compute spherical mode coefficients

Maximum mode index N:

Рис. 11.14. Задание расчета характеристик дальнего поля

```

FF 1 181 0 0 0.0 0.0 1.0 (это рекомендовано)
** Конец
EN

```

Модель может также быть создана так, что цилиндр заполнен тем же самым диэлектриком, как конус. Такой подход развяжет внутренние и внешние задачи и может быть очень полезен для задач с высоким коэффициентом экранирования. Нужно, однако, знать то, что число базовых функций в этом случае будет большим, что будет влиять на время выполнения и занимаемую память. В этом случае карты **ME** в блоке геометрии входного файла (example_11b.pre) будут немного отличаться, и блок будет следующим:

- ** Генерирование геометрии (только одна четверть)
- ** Сторона цилиндра и дно - металлические треугольники на диэлектрической поверхности
- ** Заметим, что нормальные направления требуют двух карт ME

```

ME 0 1 1 **диэлектрические среды
KR AU A CU 90.0 #tri_len ** черчение круга

```

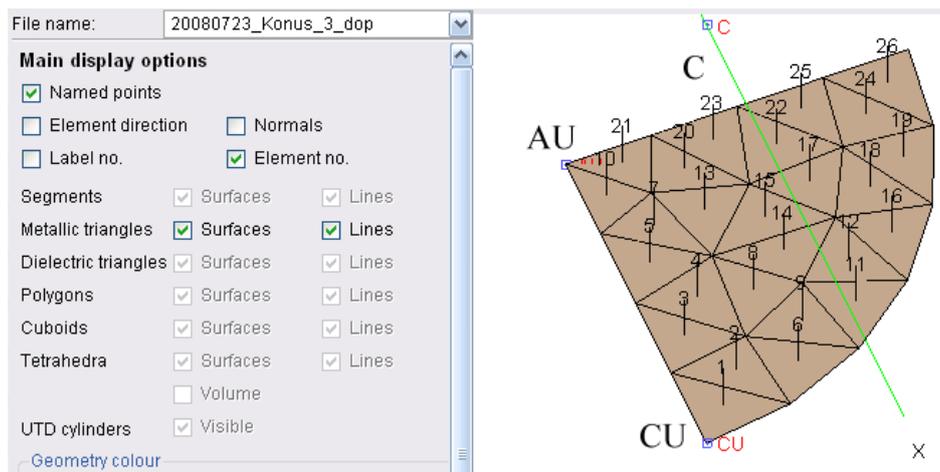


Рис. 11.15. Проверка нормалей и номеров треугольных элементов

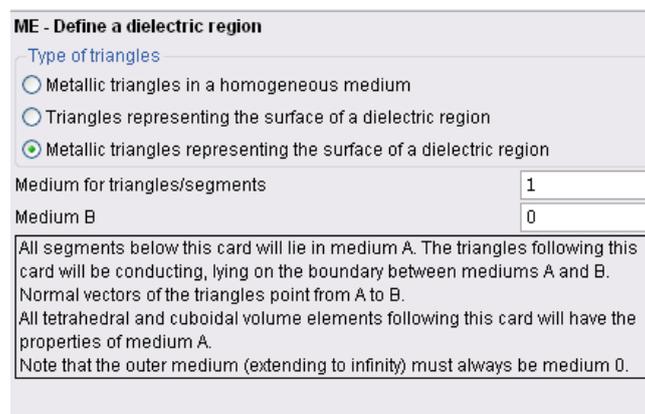


Рис. 11.16. Карта задания диэлектрической области

Все сегменты внизу этой карты лежат в среде А. Треугольники, следующие за этой картой, будут проводящими, лежащими на границе между средой А и средой В. Нормали этих треугольников указываются от А до В. Все тетраэдральные и кубоиды элементы, следующие за этой картой, будут иметь свойства среды А. Внешняя среда (до бесконечности) будет иметь всегда среду 0.

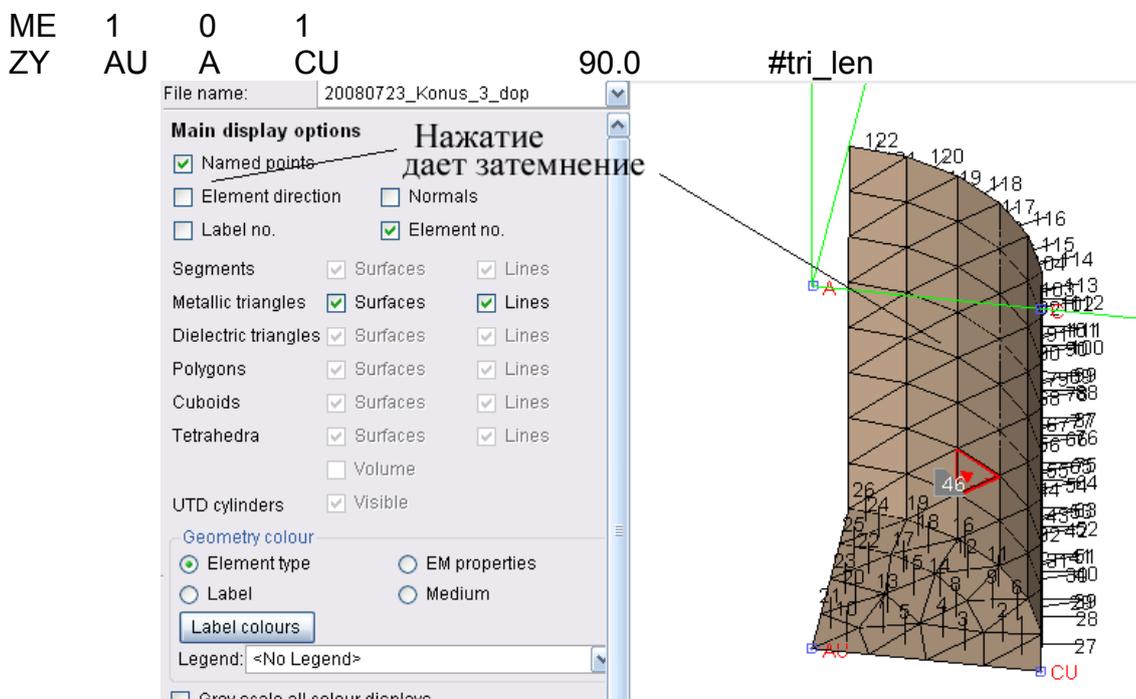


Рис. 11.17. Просмотр направлений и номеров отдельных треугольников

** треугольники на поверхности диэлектрического конуса

ME 1 0
KK A AO C 90.0 #tri_len #tri_len 0

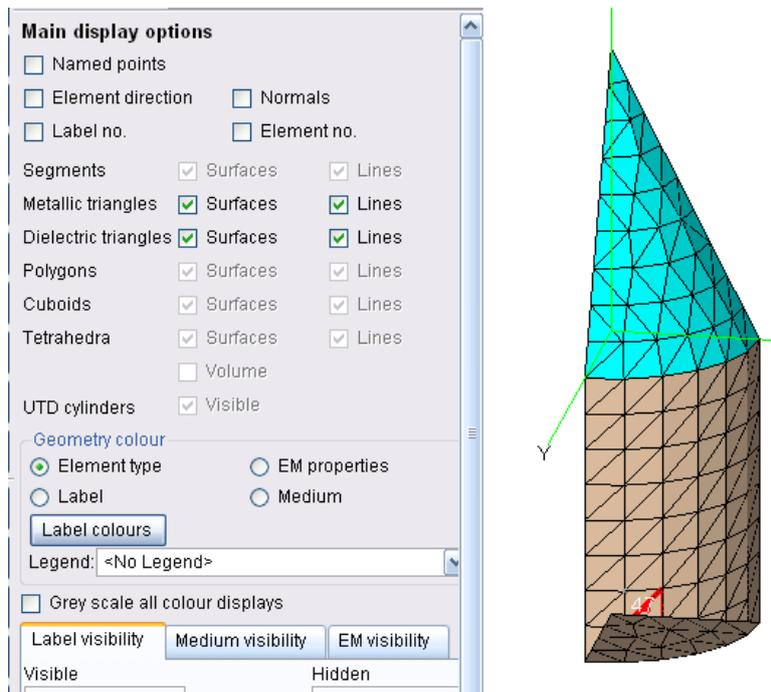


Рис. 11.18. Просмотр в POSTFEKO нижнего металлического цилиндра и верхнего диэлектрика

** - металлические треугольники внутри диэлектрического конуса от дна до вершины

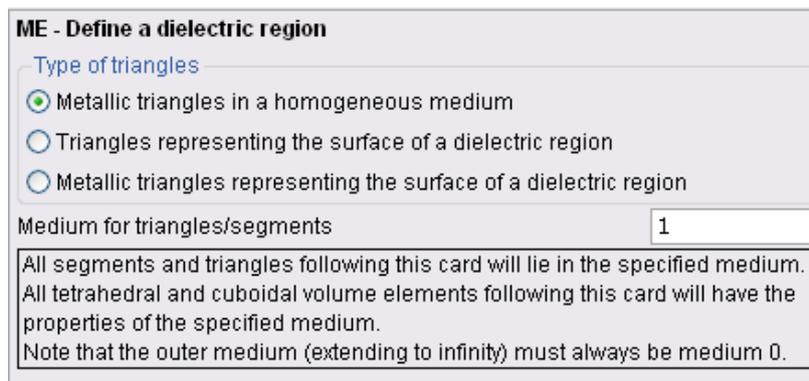


Рис. 11.19. Карта задания диэлектрической области

Все сегменты и треугольники следующие за этой картой будут лежать в заданной среде. Все компоненты, следующие за этой картой будут иметь свойства заданной среды.

Заметим, что внешняя среда должна всегда быть средой 0.

```
ME 1 ** металлич. Треуг. в диэлектр. среде 1.
KR A AO C 90.0 #tri_len ** круг между средами
```

После создания этой задачи в EDITFEKO, запустим ее на решение и в POSTFEKO выведем зависимость ЭПР (рис. 11.20).

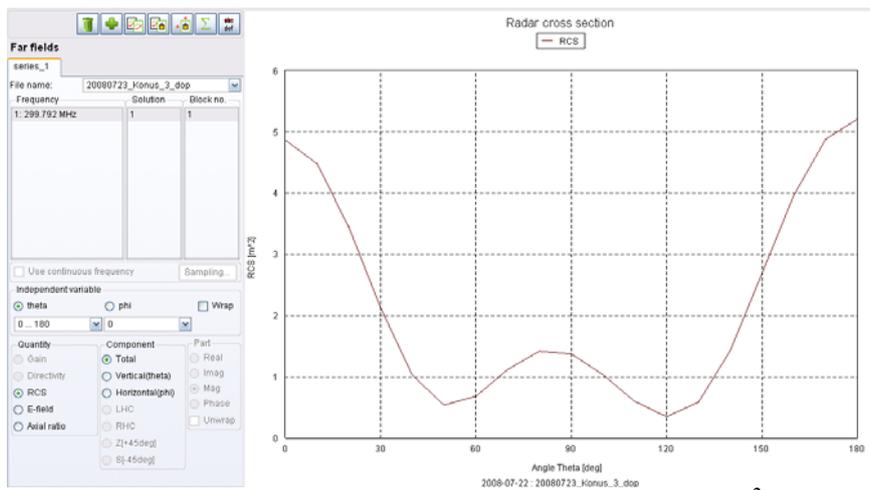


Рис. 11.20. Характеристика ЭПР ракеты в m^2

Другой подход в решении этой задачи

В этом случае заполним цилиндр другой диэлектрической средой, с номером 2. (Это потребует большего количества базисных функций, чем в случае, если цилиндр заполнен с тем же диэлектриком, как и конус). Тогда блок карт, описывающий геометрию, будет следующий:

- ** Генерирование одной четверти геометрии
- ** Сторона цилиндра и дно - металлические треугольники на диэлектрической поверхности
- ** Поверхность между средой 2 и воздухом (средой 0)

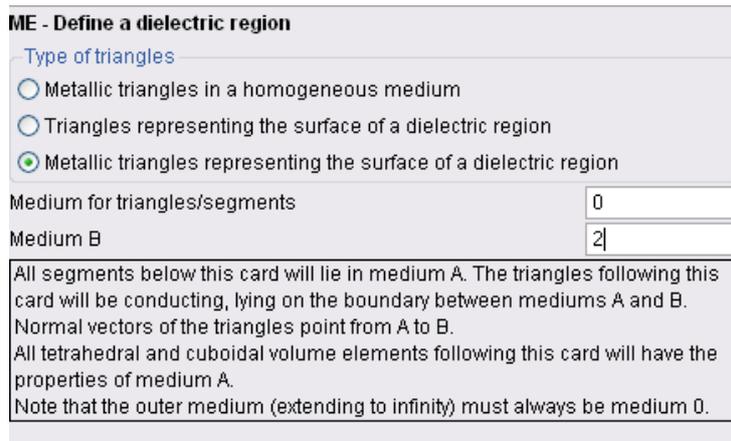


Рис. 11.21. Установка металлических треугольников на поверхности диэлектрической области

```
ME 0 2 1
KR AU A CU 90.0 #tri_len
```

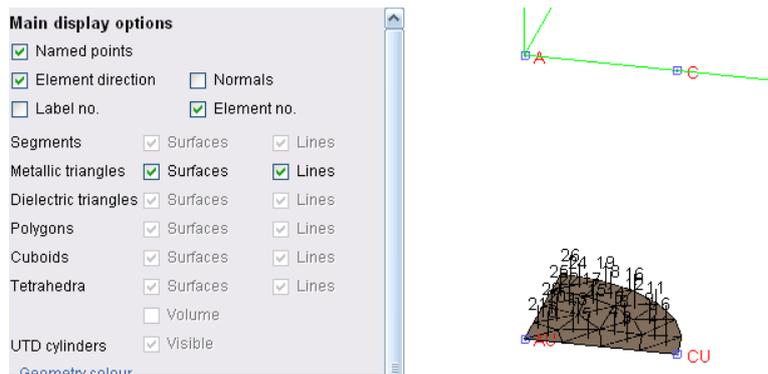


Рис. 11.22. Проверка металлических треугольников на поверхности цилиндра

```
ME 2 0 1 ** представление металлических треугольников на
диэлектрическом цилиндре
```

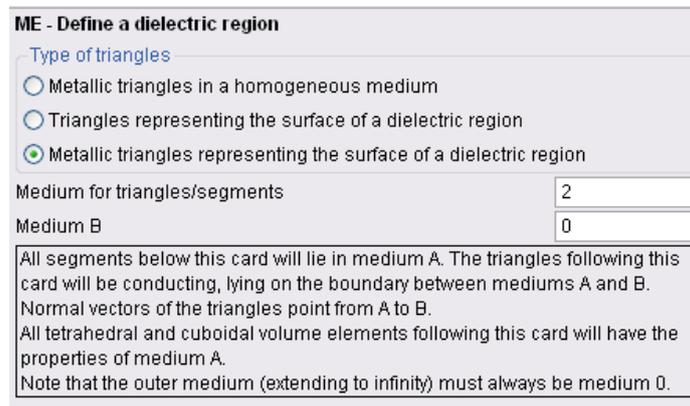


Рис. 11.23. Установка металлических треугольников на поверхности цилиндра

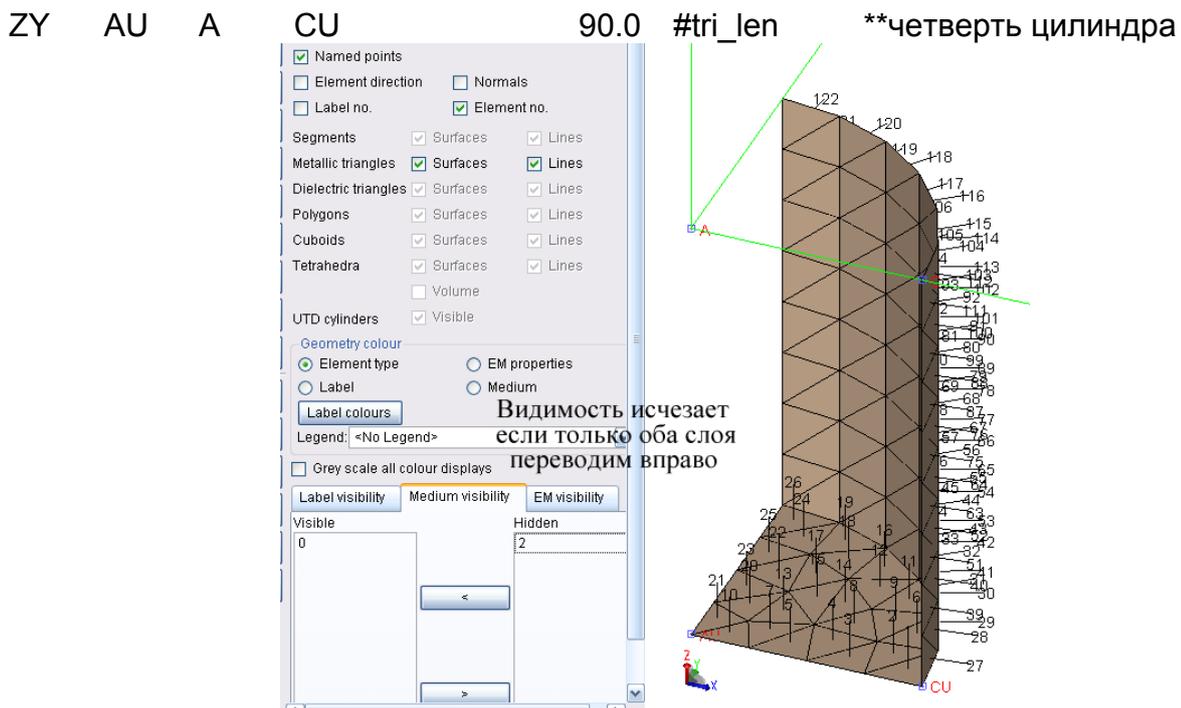


Рис. 11.24. Контроль поверхностей в POSTFEKO после этого шага

** Конус - треугольники на поверхности диэлектрического конуса (среда 1)
ME 1 0

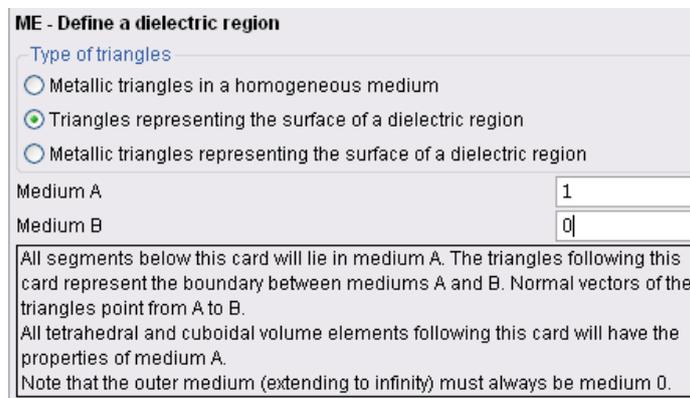


Рис. 11.25. Задание треугольников на поверхности диэлектрической области

KK A AO C 90.0 #tri_len #tri_len 0

** конус

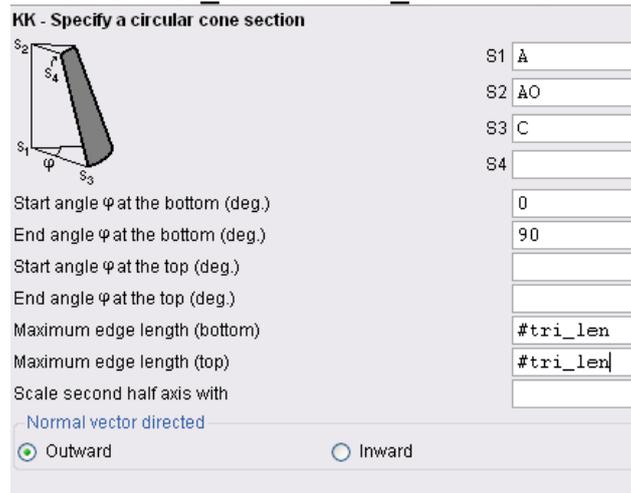


Рис. 11.26. Черчение поверхности конуса

** На дне цилиндра и верхней части конуса находятся металлические треугольники на диэлектрической поверхности

** Поверхность между средой 1 и средой 2

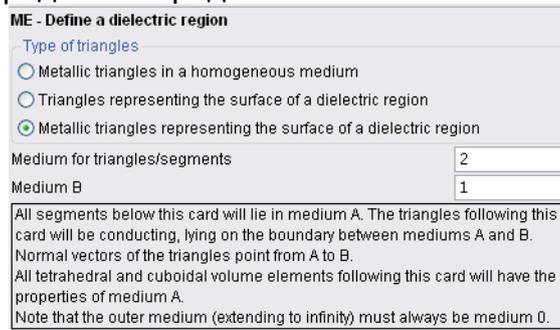


Рис. 11.27. Определение диэлектриков

ME 2 1 1
KR A AO C

90.0 #tri_len

**черчение четверти круга в середине

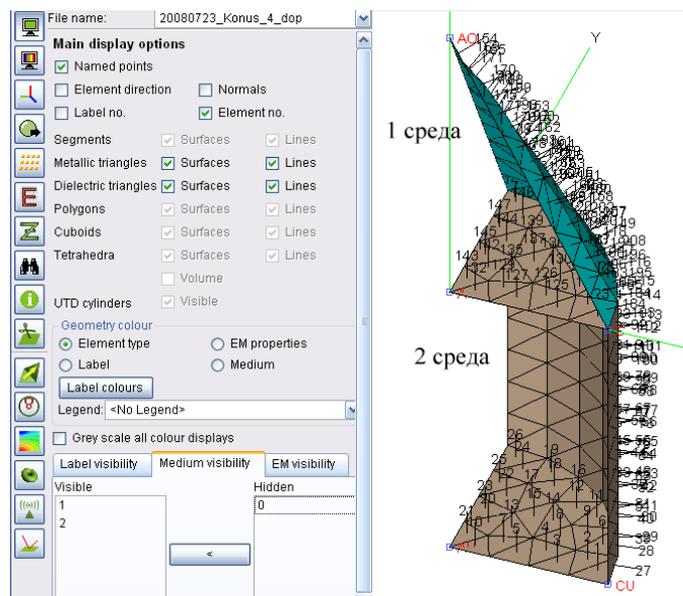


Рис.11.28. 1 и 2 среда в конструкции ракеты

```

KR  A   AO   C           90      #tri_len
SY  1   2   3   0
EG  1   0   0           0

** Диэлектрические свойства среды|
DI  1           #epsr   1       0
DI  2           1       1       0

** Частота
#freq = #c0 / #lambda

```

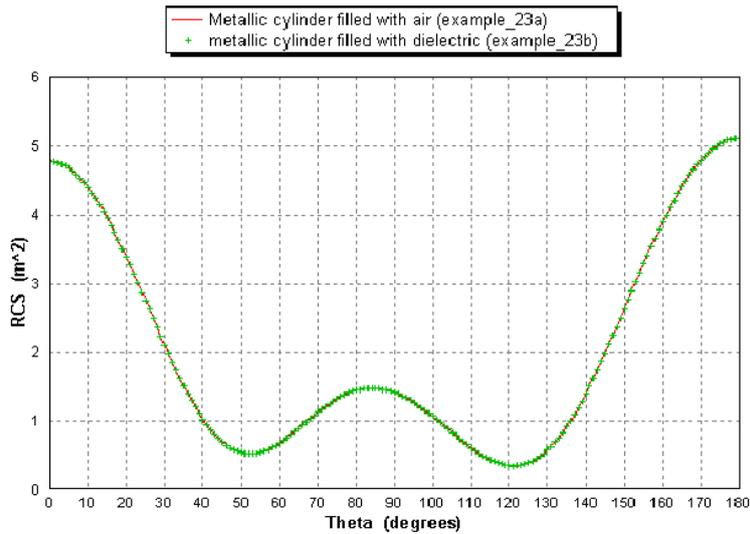


Рис. 11.29. Зависимость эффективной площади рассеяния как функция угла

Расчет ЭПР летательных объектов важен для проектирования объектов с низкой отражательной способностью. В приведенном примере мы получили, что ЭПР зависит от направления наблюдения объекта. Наименьшее значение ЭПР равно менее 0.5 м^2 , а наибольшая ЭПР около 5 м^2 .

Выполним также решение этой задачи в САДФЕКО.

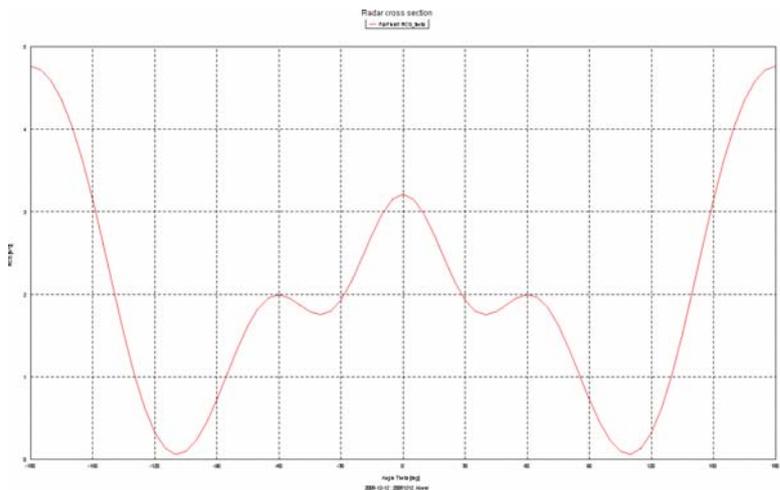
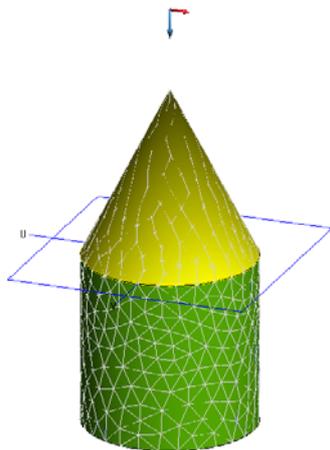


Рис 11.30. ЭПР ракеты в диапазоне азимутальных углов отражения

Можно решить эту задачу и без учета симметрии. Для того, чтобы рассчитать отраженную волну в направлении падающей волны введем переменную падения *paden*. Файл задачи будет следующий:

```
#lambda = 1.0          ** Длина волны
#a = 0.3*#lambda      ** Радиус цилиндра
#h = 0.6*#lambda      ** Высота цилиндра и конуса
#epsr = 2             ** Относительная диэлектрическая проницаемость
#paden=45
** Параметры сегментации
#tri_len = #lambda / sqrt(#epsr) / 9      **сторона треугольника
IP          #tri_len
** Определение ключевых точек конструкции
DP A        0    0    0
DP AO       0    0    #h
DP AU       0    0   -#h
DP C        #a   0    0
DP CU       #a   0   -#h
ME 0 2 1    **поверхность между средой 2 и воздухом
KR AU A CU  360 #tri_len **
ME 2 0 1    **представление металл. треуг. на диэл. цил.
ZY AU A CU 0 360 #tri_len **
** построение конуса в виде треугольников на поверхности диэлектрического
конуса (среда 1)
ME 1 0      **определение среды 1 (диэл) и среды 0 (возд)
KK A AO C   360 #tri_len #tri_len          360 0 0
**KK A AO C 90.0 #tri_len #tri_len 0      ** в среде 1 строится
диэл. конус
ME 2 1 1
KR A AO C   360 #tri_len
```

```

**SY 1 2 3 0
EG 1 0 0 0 1
** Диэлектрические свойства среды
DI 1 #epsr 1 0
DI 2 1 1 0
** Частота
#freq = #c0 / #lambda
FR 1 #freq
** Падающая плоская волна
AO 0 1 1 1 #paden
FF 1 361 1 0 0 0 1 0
EN

```

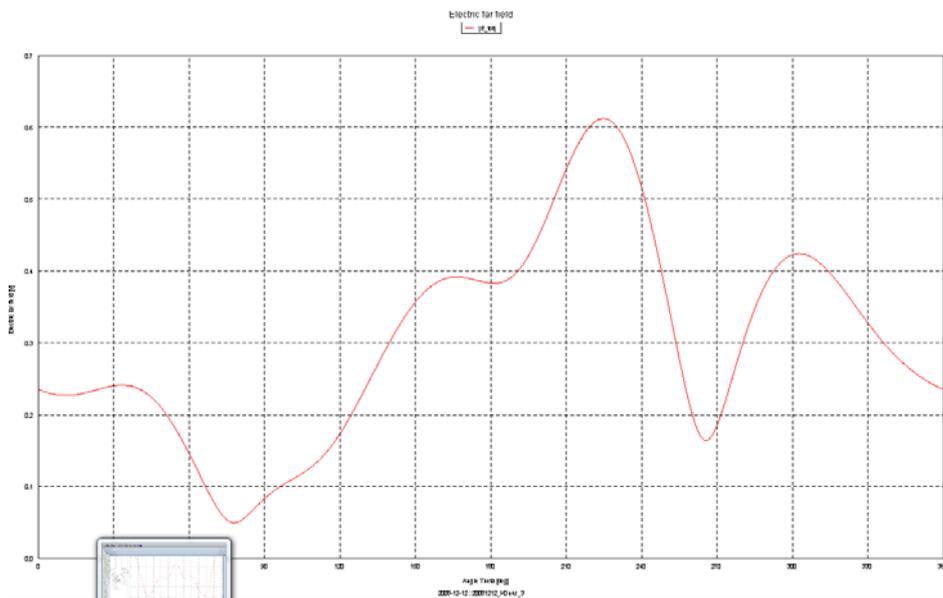


Рис. 11.31. Сечение параметра ЭПР при падении плоской волны на ракету

Поставим теперь угол падения $paden=0$ и рассчитаем частотную зависимость ЭПР.

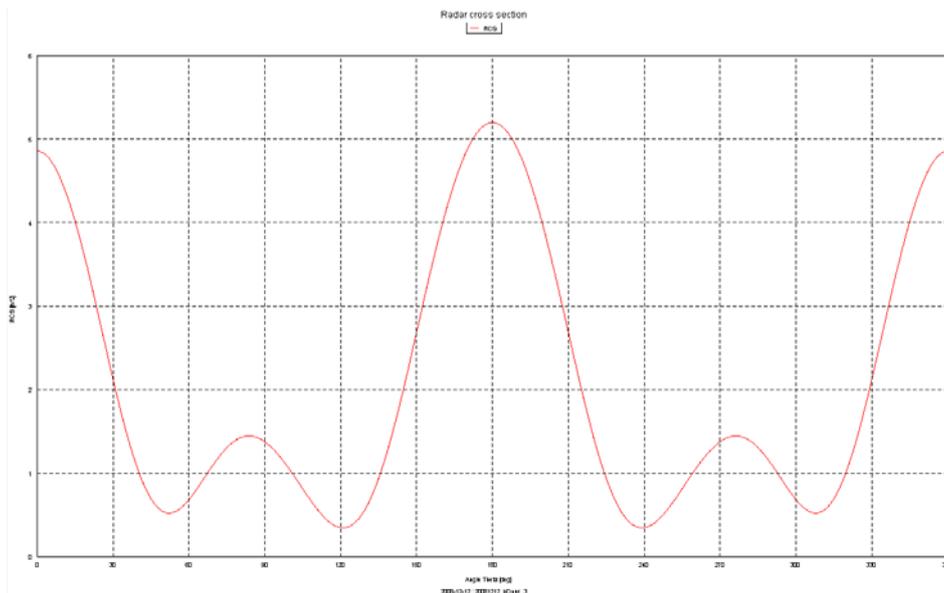


Рис. 11.32. ЭПР при изменении угла падения плоской волны на ракету

Параметр *paden* изменяется от 0 до 180 градусов. Выполним параметрическую оптимизацию (т.е. расчет задачи для всех значений параметра *paden*).

** The optimisation parameters follow:

** Name	Begin value	Minimum	Maximum
#paden	0	0	180

** Calculate function at discrete increments

GRID_SEARCH

19

** Optimise for gain

RCS

-2 1 0

В файле .log

No.	#paden	Aim fct.	Other spec.
1	0.0000e+000	0.0000e+000	1 -0.0000e+000
....			
19	1.8000e+002	0.0000e+000	1 -0.0000e+000

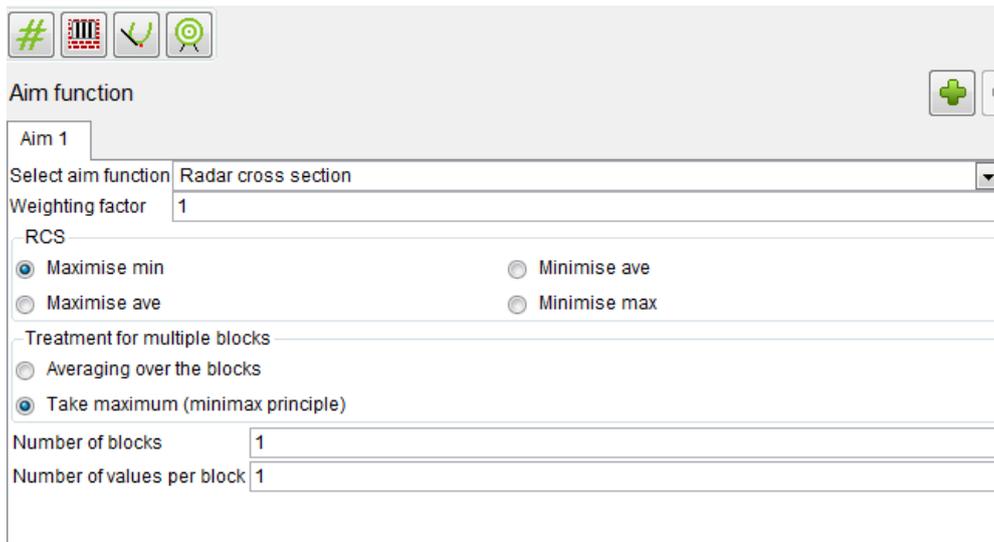


Рис. 11.33. Выбор целевой функции в виде ЭПР

===== *Optimisation and Analysis* =====

No. #paden Aim fct. Other spec.
 1 0.0000e+000 -2.1125e+000 1 -2.1125e+000

 19 1.8000e+002 -2.1125e+000 1 -2.1125e+000
 Raster-scan finished
 Result destination vector: #paden = 0.0000000e+000
 Minimal value of the aim function (at no. 1): -2.1124600e+000
 no. of the last analysis: 19

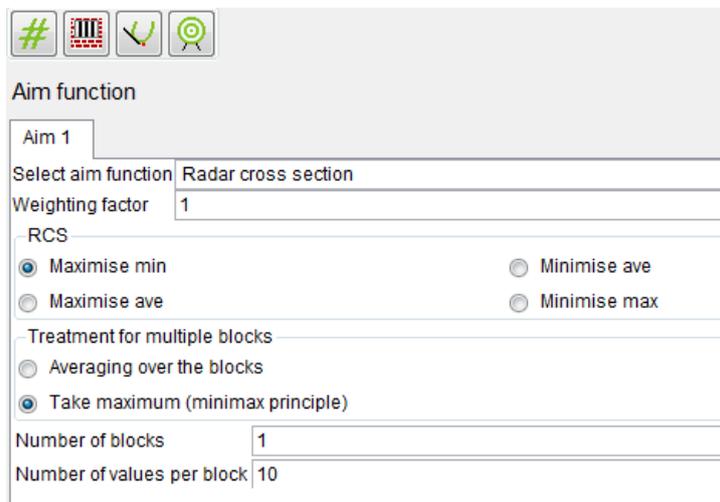


Рис.11.34. Задание целевой функции для вывода значений RCS

Output
 under 'Aim funct.':
 the peak or average RCS (neg. for maximisation
 under 'Other spec.' (only in LOG-file):

the index of the block
the maximum value over all blocks

Weighting factor of this aim function: 1.000000

===== *Optimisation and Analysis*=====

<i>No.</i>	<i>#paden</i>	<i>Aim fct.</i>	<i>Other spec.</i>
<i>1</i>	<i>0.0000e+000</i>	<i>0.0000e+000</i>	<i>1 -0.0000e+000</i>
<i>.....</i>			
<i>18</i>	<i>1.7000e+002</i>	<i>0.0000e+000</i>	<i>1 -0.0000e+000</i>

===== *Aim function RCS*=====

Maximisation of the minimum peak RCS
Minimisation of the average over all blocks
1 blocks are read.
10 lines are read per block.

Output
under 'Aim funct.':
the peak or average RCS (neg. for maximisation
under 'Other spec.' (only in LOG-file):
the index of the block
the maximum value over all blocks

===== *Aim functions*=====

Data follows for the 1 aim functions

===== *Aim function RCS*=====

Maximisation of the minimum peak RCS
Minimisation of the average over all blocks
1 blocks are read.
10 lines are read per block.

Output
under 'Aim funct.':
the peak or average RCS (neg. for maximisation
under 'Other spec.' (only in LOG-file):
the index of the block
the maximum value over all blocks

Weighting factor of this aim function: 1.000000

Максимизация минимального значения пика ЭПР

Минимизация среднего значения по всем блокам

1 блок прочитан

10 линий прочитаны на 1 блок

Выходные данные

===== *Optimisation and Analysis* =====

<i>No.</i>	<i>#paden</i>	<i>Aim fct.</i>	<i>Other spec.</i>
<i>1</i>	<i>0.0000e+000</i>	<i>-1.0957e-002</i>	<i>1 -1.0957e-002</i>
<i>2</i>	<i>1.0000e+001</i>	<i>-1.0957e-002</i>	<i>1 -1.0957e-002</i>
<i>.....</i>			
<i>19</i>	<i>1.8000e+002</i>	<i>-1.0957e-002</i>	<i>1 -1.0957e-002</i>

В заключении этого раздела отметим, что в последующих версиях FEKO реализованы также другие методы оптимизации.

12. Оптимизация двухспиральной антенны в EDITFEKO

Запускаем EditFEKO и вводим переменные, которые описывают конструкцию двухспиральной антенны. Создадим файл с расширением *.pre. Для того, чтобы выполнить последующую оптимизацию, в этом файле нужно ввести скрипты, которые будут осуществлять проверку, заданы ли оптимизируемые переменные. В качестве варьируемых параметров выберем высоты отдельных частей спирали, а также количество витков их: N1 и N2.

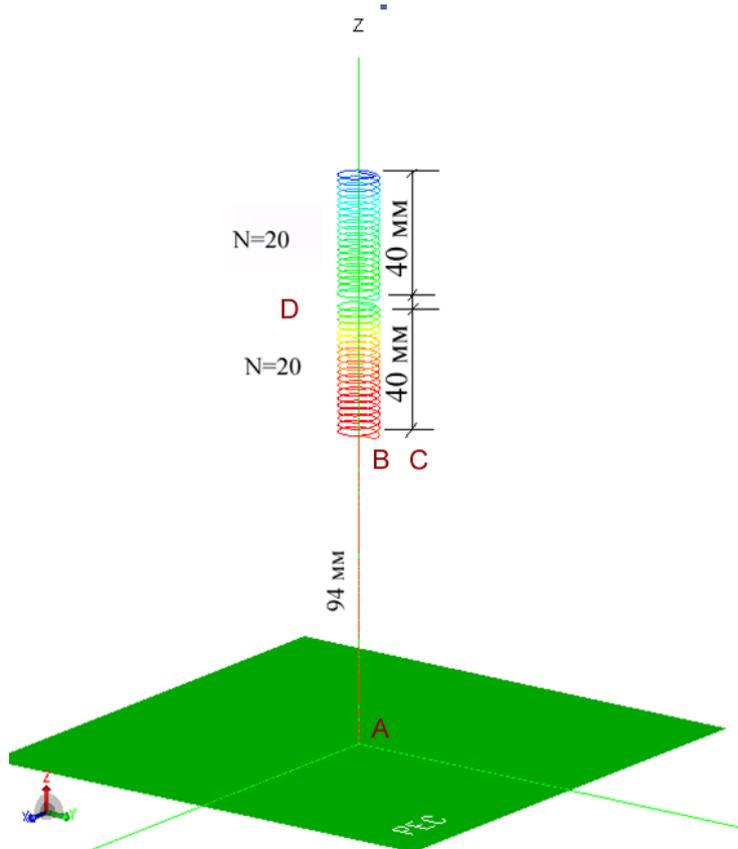


Рис. 12.1. Конструкция двухспиральной антенны в окне программы POSTFEKO

Текст модели, набираемой в EDITFEKO:

```
#Diam1=10          ** диаметр верхней спирали
#Diam2=10          ** диаметр нижней спирали
#H_sp_1=30         ** высота верхней спирали
#H_sp_2=60         ** высота нижней спирали
#l_vib=180         ** Общая длина вибратора (не используется)
#L1=0              ** длина провода вверху
#L2=94             ** длина провода внизу
#Ist=2             ** размер источника
**#N1=10           ** кол-во витков вверху
**#N2=12           ** кол-во витков нижней спирали
```

```

#rad1=#Diam1/2          ** радиус верхней спирали
#rad2=#Diam2/2          ** радиус нижней спирали
#freq = 120.0e6          ** частота расчета в Гц
**#lambda = #c0 / #freq  ** Длина волны в м

!! If (not(defined(#N1))) then
#N1 = 30
!! Endif
**Условия на изменяемые переменные при оптимизации
!! If (not(defined(#N2))) then
#N2 = 10
!! Endif
**!! If (not(defined(#H_sp_1))) then
**#H_sp_1 = 70
**!! Endif

** Разбиение спиральной антенны на сегменты
IP          0.05          2          **параметры разбиения на сегменты
SF 1        0.001        **коэффициент масштабирования
DP A        0          0          0          ** точка A
DP B        0          0          #L2        **точка B
BL A B      **отрезок нижнего провода

DP C        0          #rad2  #L2        **точка C
DP: D : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2        **точка D

HE B D C 0   #N2  2          **черчение спирали
DP: E : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2+#Lst   **точка E
DP: G : : : : 0 : #rad1 : #H_sp_2+#L2+#Lst **точка G
DP: F : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2+#H_sp_1

HE E F G 0   #N1  2

LA 1
BL D E

EG 0 0 0 0          1

A1 0 1          1  0
FR 1          #freq ** частота
BO 2
**FR 20 2          50e6  50e6  500e6 **диапазон частот

OS 1  1
FF 1 19 37 0  0  0  10  10 **дальнее поле
**SP 1 1          50

EN

```

Создадим эту программу, используя карты, и запустим на расчет из EDITFEKO командой **Run -> FEKO**. После выполнения решения можно запустить POSTFEKO и вывести частотную характеристику (рис. 12.2).

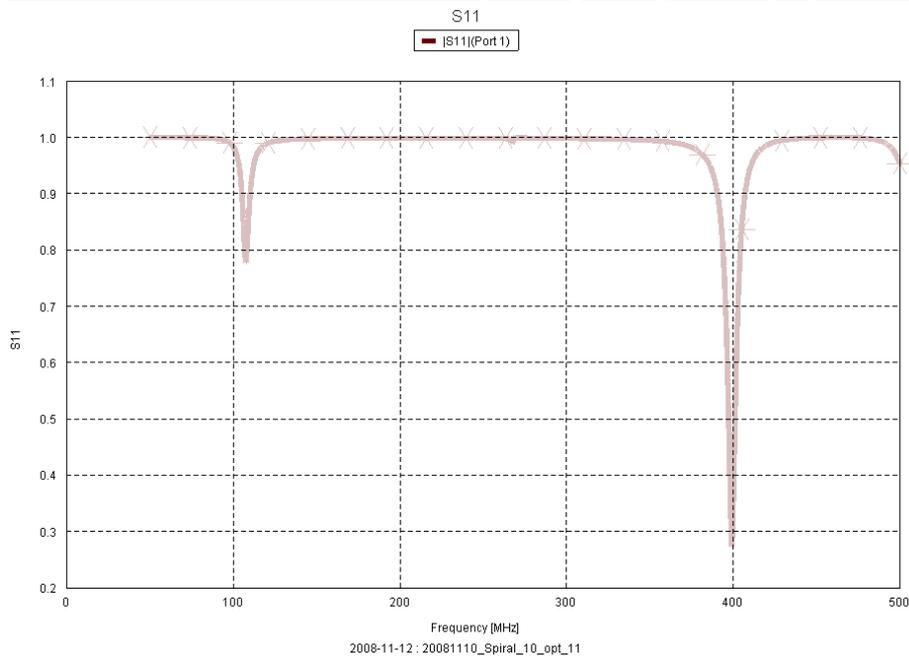


Рис. 12.2. Частотная характеристика S_{11} двухспиральной антенны

Также удобно вывести реальную и мнимую части входного импеданса двухспиральной антенны (рис. 12.3).

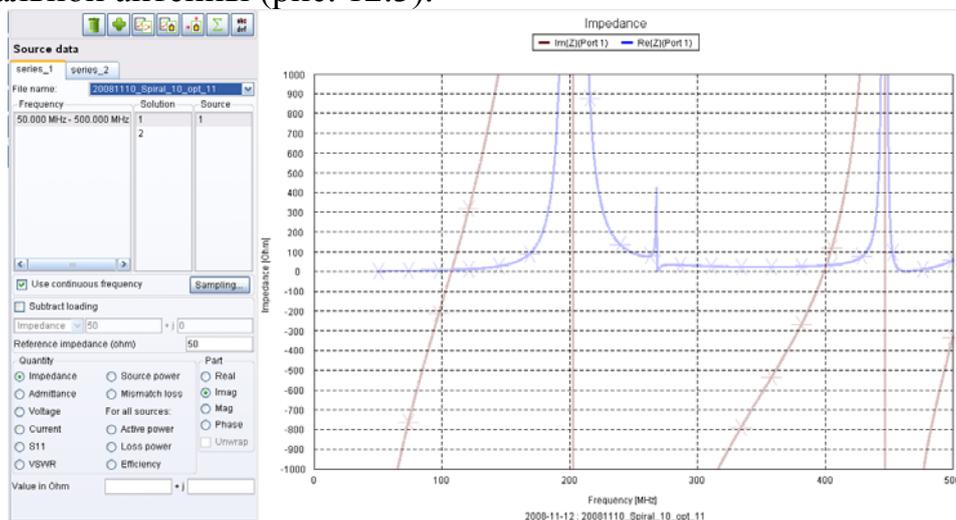


Рис. 12.3. Частотная характеристика реальной и мнимой части двухспиральной антенны

Теперь, после анализа, сделаем установки на оптимизацию, в качестве цели которой зададим лучшее согласование на частоте 120 МГц и на частоте 400 МГц. Для этого нужно задать специальный файл с расширением .opt.

Чтобы создать файл оптимизации, нажимаем на значок  в линейке меню и далее на кнопку Edit в появившемся слева окне. Теперь нужно:

1. Задать изменяемые параметры.

2. Задать штрафные функции.
3. Выбрать метод расчета и количество точек в диапазоне изменения каждой переменной.
4. Выбрать целевую функцию.

Файл, который должен иметь то же имя, что и файл с расширением *.pre?, создается после нажатия кнопки «Edit».

```
** The optimisation parameters follow:
** Name          Begin value  Minimum      Maximum
#N_sp_1         30          30          70
#N2             6           6           10
#N1            11          11          30
```

** Расчет целевой функции на дискретных точках

```
GRID_SEARCH
  5      5      10
```

** Оптимизация для импеданса [Optimise for impedance (reflection factor)]

```
IMPEDANCE
50 0 2 0
```

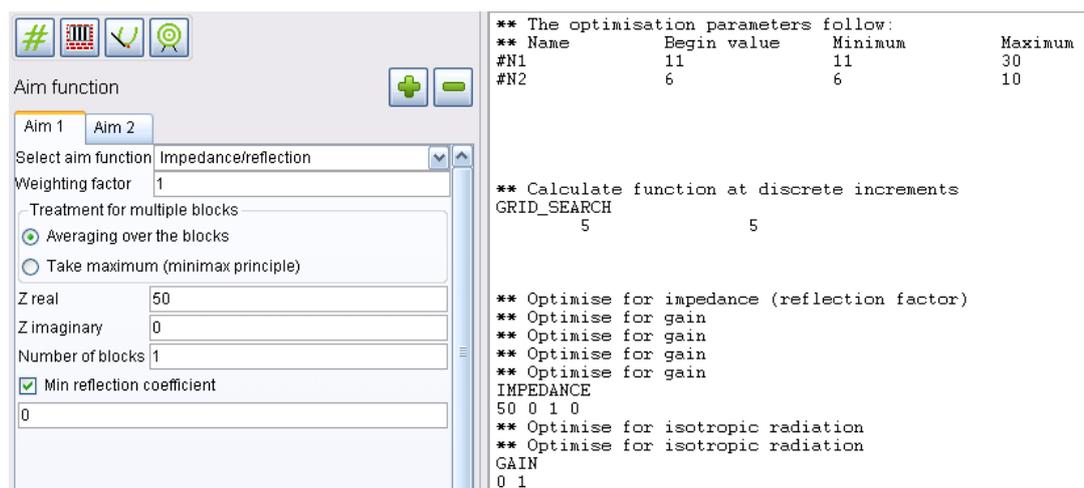


Рис. 12.4. Закладка целевой функции для оптимизации

Опция **Number of blocks** – количество блоков – это количество решаемых характеристик в программе, из которых формируется целевая функция. Поставим ее равной 1.

Для начала, поставим одну частоту 120 МГц. После выполнения первого пробного расчета, запускаем ОРТФЕКО. Программа ОРТФЕКО будет менять значения N1 и N2 и каждый раз обращаться к программе .pre

В ФЕКО версии 5.2 результаты параметрической оптимизации просматриваются только из файла с расширением .log

LOG - FILE - OPTFEKO =====

Version: 11.3 of 2006-02-15
Date: 2008-11-12 15:42:07
File: 20081110_Spiral_10_opt_11

OPTIMISATION WITH FEKO

===== Optimisation variables =====

No.	Name	Beg.value	Minimum	Maximum
1	#N_sp_1	3.0000e+001	3.0000e+001	7.0000e+001
2	#N2	6.0000e+000	6.0000e+000	1.0000e+001
3	#N1	1.1000e+001	1.1000e+001	3.0000e+001

===== Optimisation method raster search =====

No.	Name	Quantity	Minimum	Maximum	Step
1	#N_sp_1	5	3.0000e+001	7.0000e+001	1.0000e+001
2	#N2	5	6.0000e+000	1.0000e+001	1.0000e+000
3	#N1	10	1.1000e+001	3.0000e+001	2.1111e+000

===== Aim functions =====

Data follows for the 1 aim functions

===== Aim function Impedance =====

Minimisation of the average over all blocks
2 blocks are read.
The value of the reflection factor
is calculated relative to the selected destination impedance
 $Z_{\text{soil}} = (50.000000 + j0.000000) \text{ Ohm}$
Minimum reflection coefficient is 0.000000 dB
Output

under 'aim funct.':
the averaged reflection coefficient (linear),
under 'Other spec.' (only in LOG-file):
the real and imaginary part of the impedance
of the first block.

Weighting factor of this aim function: 1.000000

===== Optimisation and Analysis =====

No.	#N_sp_1	#N2	#N1	Aim fct.	Other spec.
1	3.0000e+001	6.0000e+000	1.1000e+001	1.0000e+000	6.0079e+000 -5.6630e+002
..					
250	7.0000e+001	1.0000e+001	3.0000e+001	1.0000e+000	9.6893e+000 2.9063e+002

Raster-scan finished

Result destination vector: #N_sp_1 = 3.0000000e+001
#N2 = 6.0000000e+000
#N1 = 1.1000000e+001

Minimal value of the aim function (at no. 1): 1.0000000e+000
no. of the last analysis: 250

Последнее сообщение говорит, что минимальное значение целевой функции равно 1 получено на 250 шаге анализа (обращения к программе расчета антенны). Максимальная реальная часть 9.6 Ом . В разделе other specification можно видеть реальную и мнимую части входного импеданса антенны. После выполнения оптимизации можно установить оптимальные параметры и запустить FEKO.

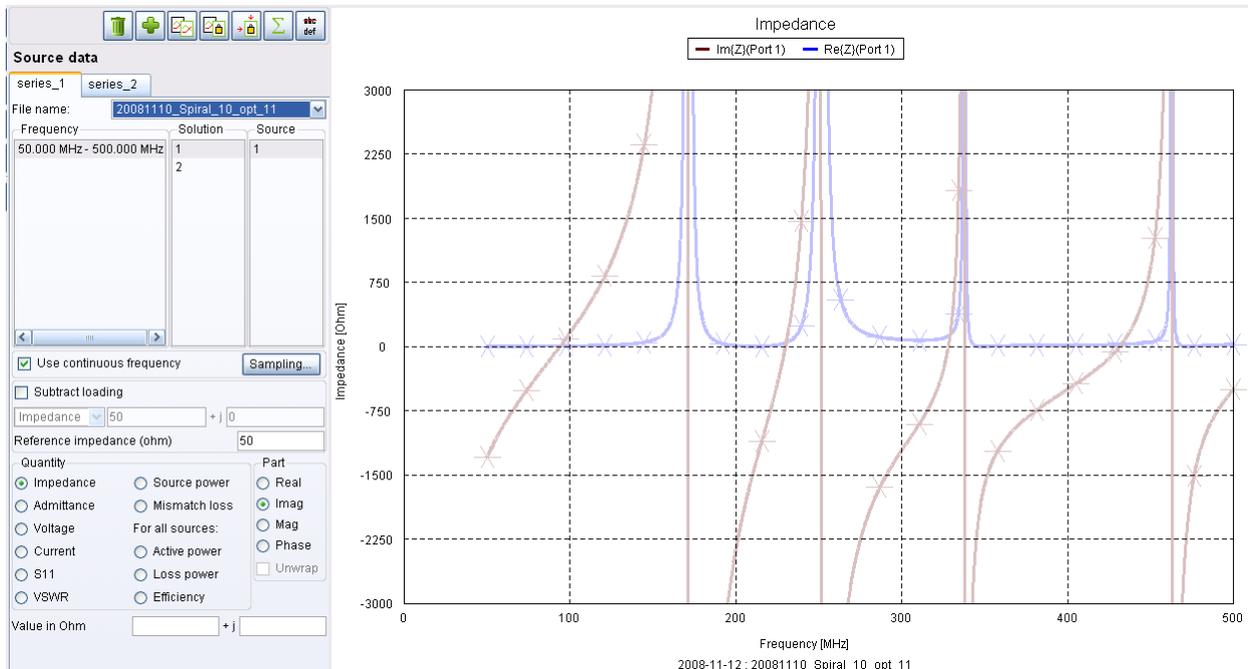


Рис. 12.5. Частотная характеристика после оптимизации

Теперь установим 2 частоты анализа и зададим целевую функцию, которая бы описывала степень согласования антенны одновременно на обеих частотах.

Файл программы будет следующий:

```
#Diam1=10      ** диаметр верхней спирали
#Diam2=10      ** диаметр нижней спирали
#H_sp_1=30     ** высота верхней спирали
#H_sp_2=60     ** высота нижней спирали
#l_vib=180     ** Общая длина вибратора (не используется)
#L1=0          ** длина провода вверху
#L2=94         ** длина провода внизу
#Ist=2         ** размер источника
**#N1=10      ** кол-во витков вверху
**#N2=12      ** кол-во витков нижней спирали
#rad1=#Diam1/2 ** радиус верхней спирали
#rad2=#Diam2/2 ** радиус нижней спирали
#freq = 120.0e6 ** частота расчета
**#lambda = #c0 / #freq ** Длина волны
```

```
!! If (not(defined(#N1))) then
```

```

#N1 = 30
!! Endif
**Условия при оптимизации
!! If (not(defined(#N2))) then
#N2 = 10
!! Endif
**!! If (not(defined(#H_sp_1))) then
**#H_sp_1 = 70
**!! Endif
** Разбиение на сегменты
IP          0.05          2
SF 1        0.001          **масштаб размерности
DP A        0    0    0    **определение точки A
DP B        0    0    #L2
BL A  B

DP C        0    #rad2  #L2
DP: D : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2
HE B  D  C  0    #N2    2

DP: E : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2+#Ist
DP: G : : : : 0 : #rad1 : #H_sp_2+#L2+#Ist
DP: F : : : : 0 : 0 : #H_sp_2+#L2+#H_sp_1+#Ist

HE E  F  G  0    #N1    2
LA 1          **метка 1
BL D  E
EG 0  0  0    0          1

A1 0  1          1    0
**FR 1          #freq ** частота
**BO 2
**SP 1  0          50

**FR 20 2          50e6  50e6  500e6 **диапазон частот
FR 2  1          120e6  400e6
BO 2          ** моделирование земляной плоскости
OS 1    1          **расчет тока на всех металлических поверхностях
**FF 1  19 1  0    0    0    10    0
**FF 1  19 37 0    0    0    10    10 **дальнее поле

**SP 1  1          50

EN

```

Итак, ОРТФЕКО позволяет выполнить оптимизацию конструкции СВЧ устройства, при задании различных типов целевой функции. В этом примере была выполнена оптимизация по критерию согласования антенны. Целевую функцию можно задать по нескольким характеристикам. В этом случае такая оптимизация называется векторная многокритериальная оптимизация.

13. Оптимизация вибратора перед отражающей плоскостью

Используя представление в картах и программу OPTFEKO, выполним оптимизацию конструкции антенны, показанной на рис. 13.1. Нужно найти условия, при которых её направленность по оси x и усиление максимальные.

Изменяемыми параметрами при оптимизации будут угол изгиба α вибратора и расстояние a между вибратором и квадратным отражателем –рефлектором.

Целью оптимизации будет получение максимального усиления антенны вдоль оси излучения x . В силу симметричности антенны, используем этот факт, и поставим электрическую и магнитную стенки.

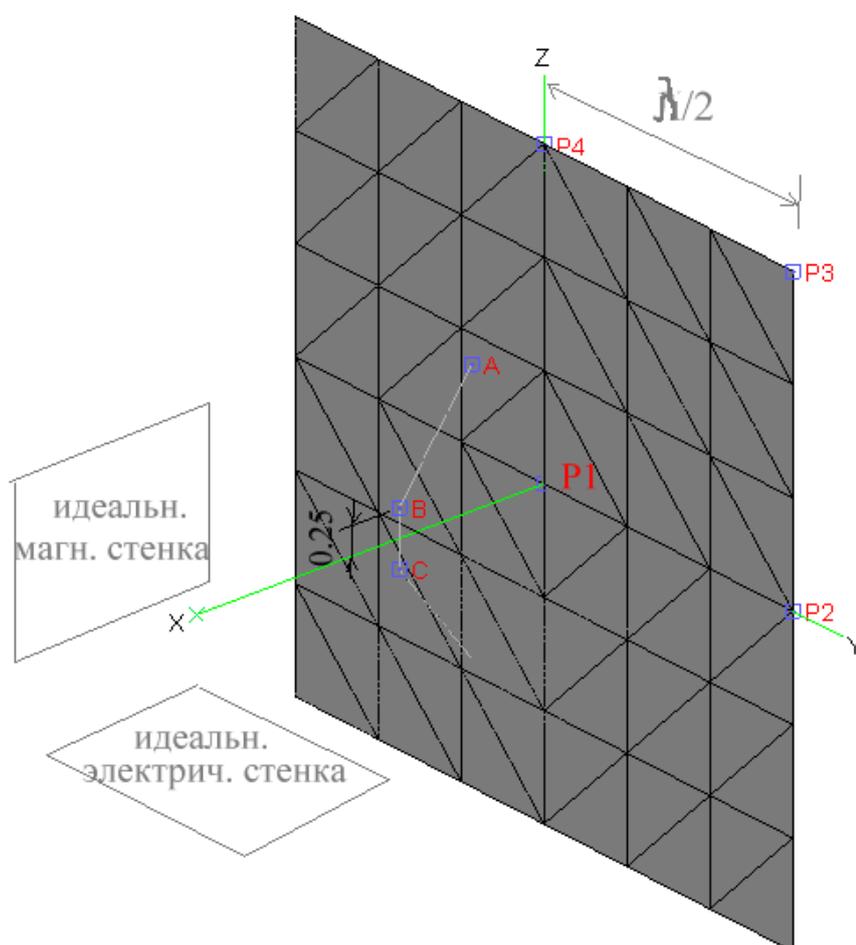


Рис. 13.1: Согнутый вибратор перед отражающей плоскостью

Входной файл **dipole.pre** для этой антенны следующий:

```
#lambda = 1      **Длина волны 1 м (частота 300 MHz)
#seglen = #lambda/10  ** Длина сегмента, на которые делятся провода
```

```

#segrad = #lambda/1000      **Радиус сегмента провода
#side_1 = #lambda           **Максимальная длина стороны треугольника

```

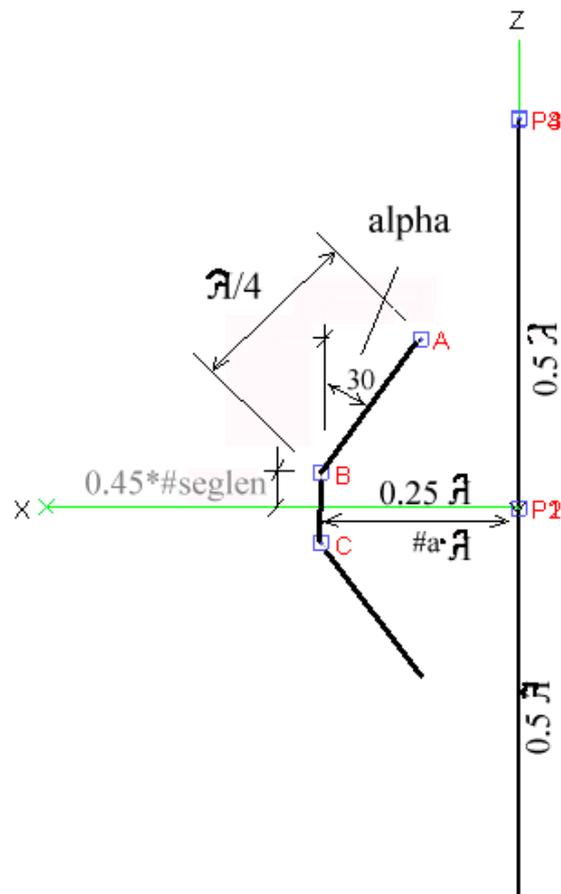


Рис. 13.2. Конструкция оптимизируемой антенны, вид сбоку

```

** Параметры оптимизации (#alpha и #a) задаются в OPTFEKO
** Сначала проверяется, были ли переменные определены и зададим их такими,
что можно запустить PREFEKO перед оптимизацией.

```

```

!! If (not(defined(#a))) then

```

```

#a = 0.25

```

```

!! Endif

```

```

!! If(not(defined(#alpha))) then

```

```

#alpha = 30

```

```

!! Endif

```

```

** Неизменяемые параметры

```

```

#lambda = 1

```

```

#seglen = #lambda/10

```

```

#segrad = #lambda/1000

```

```

#side_1 = #lambda/5

```

```

** Установка параметров сегментации
IP          #segrad  #side_1  #seglen
** Определение четырех точек углов отражающей плоскости

DP  P1          0.0          0.0          0.0
DP  P2          0.0          #lambda/2      0.0
DP  P3          0.0          #lambda/2      #lambda/2
DP  P4          0.0          0.0          #lambda/2
#x = #a*#lambda - #lambda/4*sin(rad(#alpha))
#z = #lambda/4*cos(rad(#alpha))
DP  A          #x          0.0          #z
#z = 0.45*#seglen
DP  B          #a          0.0          #z
DP  C          #a          0.0          - #z

** Определение четверти рефлектора в квадранте y > 0 и z > 0
BP  P1  P2  P3  P4
** Плоскость симметрии, отражающая поле в плоскости y=0 (xz-плоскость) -
идеальная магнитная стенка
SY  1    0    3    0

** Создание верхней половины симметричной антенны (без сегмента питания)
** Заданная по умолчанию метка (0) - все еще используется
BL  B    A
** Отражатель в плоскости z=0 (в плоскости xy) - идеальная электрическая
проводящая плоскость
SY  1    0    0    2
** Создание сегмента питания с меткой 1
LA  1
BL  B    C
** Конец ввода геометрии
EG  1    0    0    0    0
** Установить частоту расчета; #c0 - скорость света в вакууме
#freq = #c0/#lambda
FR  1    #freq
** Источник напряжения в промежутке (поле E)
A1  0    1    1.0  0.0
** Вычисление поля в дальней зоне
FF  1    1    1    0          90.0  0.0  0.0  0.0
** Конец
EN

```

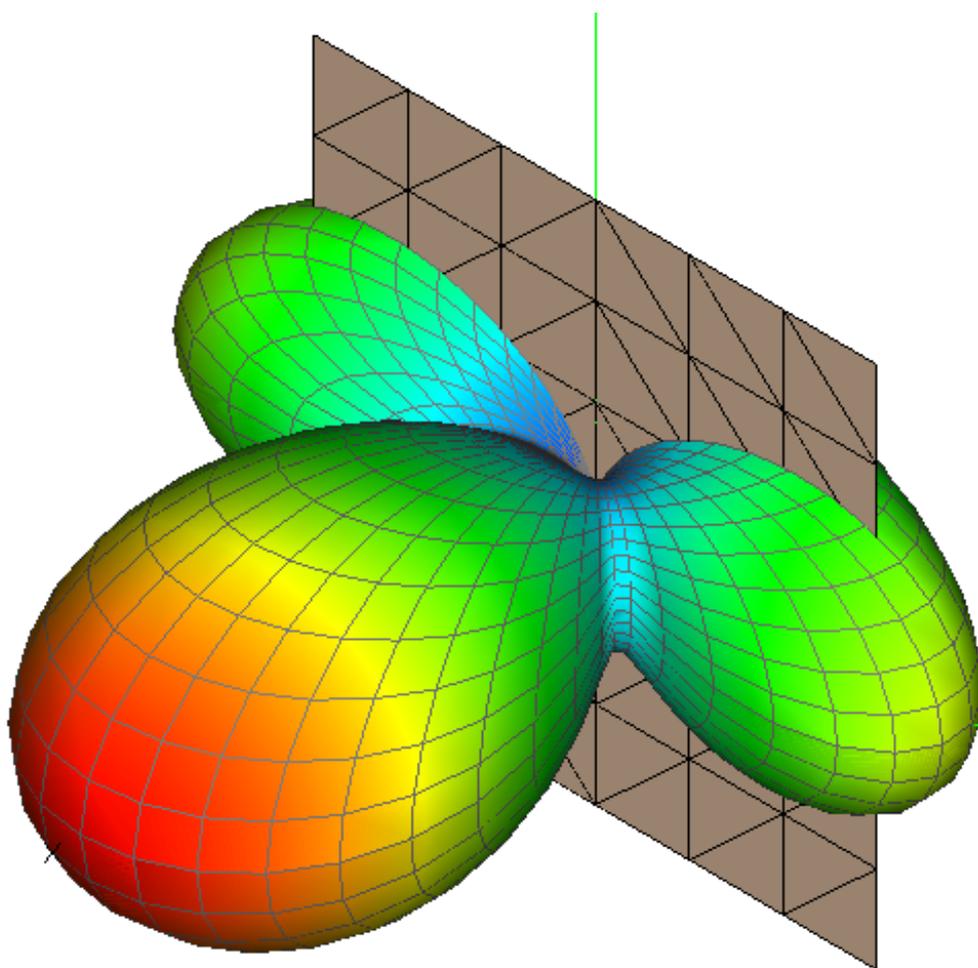


Рис. 13.3. Диаграмма направленности дальнего поля вибраторной антенны перед рефлектором

В качестве первого шага сделаем параметрическую оптимизацию, изменяя дискретно два параметра конструкции.

Файл *.opt, который создается нажатием на кнопку «Edit», следующий:

```

** Входной файл для оптимизатора OPTFEKO
** Для изогнутого вибратора перед рефлектором

** Определить параметры оптимизации
** имя      начальн.   Макс.      Мин. значения
#alpha     -80              -80        80
#a         0.25          0.25       2.0
** Выбор метода оптимизации (дискретный поиск)
GRID_SEARCH

```

20 20

** Выбор целевой функции:

** (усиление, горизонтальная и вертикальная поляризация, 1 блок данных)

GAIN

0 1

** Конец

Усиление (отрицательная целевая функция) может быть отображена графически в виде двумерного графика с линиями равного усиления. На рис. 10-2 можно видеть максимум в области $\alpha \approx 10^\circ$ и $a/\lambda \approx 0.8$

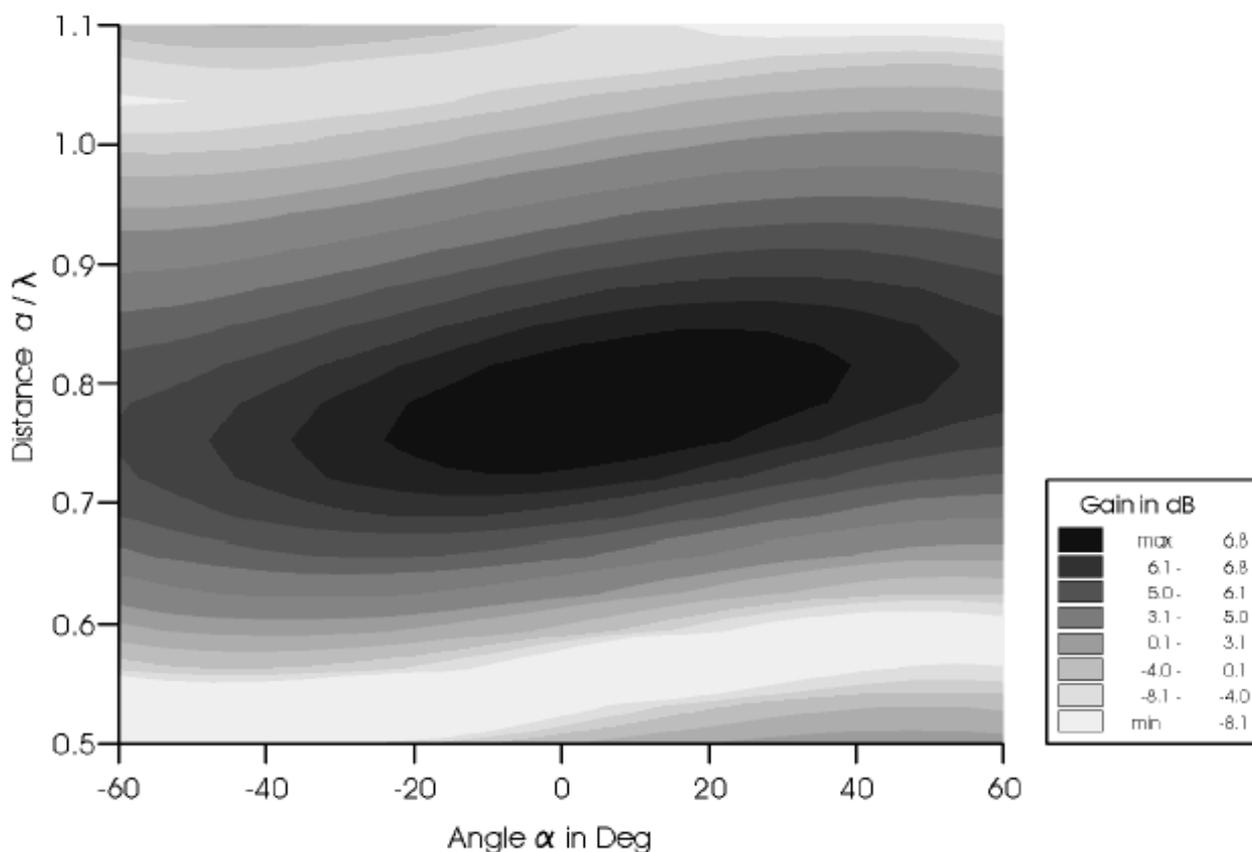


Рис.13.4: Усиление как функция параметров оптимизации

Используя параметрическую оптимизацию, находим изменение цели в широком диапазоне параметров. Теперь положение оптимума известно. Новый поиск может теперь начинать, используя, например симплексный метод, в более узком диапазоне изменения параметров, используя входной файл ***.opt**, показанный ниже.

** Входной файл для оптимизации изогнутого вибратора перед рефлектором

** Задание параметров оптимизации

** Имя начальное минимальное минимальное значения

```
#alpha    20          -20          40
#a        0.8        0.7          0.9
```

** Определить штрафные функции вне области оптимизации

PENALTY_FUNCTION

```
100  100
```

```
10   10
```

** Оптимизация симплексным методом

SIMPLEX_METHOD

```
0.15  0.5  1.0E-4  1.0E-4
```

** Оптимизировать усиление (обе поляризации; только 1 блок данных)

GAIN

```
0    1
```

** Конец

Извлечение из файла с расширением *.log, показывает, что лучший КНД антенны получается при $\alpha \approx 7^\circ$ и $a/\lambda \approx 0.78$

===== Оптимизация и Анализ =====

№	#alpha	#a	Target fct.	Penalty fct.	Другая спецификация.
	Изменяемые параметры		целевая ф-я	Штраф	
1	2.0000e+001	8.0000e-001	-7.1538e+000	0.0000e+000	0.0000e+000 1 -7.1538e+000
...					
38	6.9938e+000	7.8250e-001	-7.2282e+000	0.000e+000	0.0000e+000 1 -7.2282e+000

Оптимизация закончена (стандартная девиация достаточно маленькая: 5.7735e-005)

Лучший результат получен при: #alpha = 6.9209918e+000
#a = 7.8159398e-001

Минимальное значение целевой функции (в номере 31): -7.2283000e+000

Номер последнего анализа: 38

Calculation of the elements of right-hand side vector
Solution of the linear set of equations with LAPAGAU
LU decomposition of the matrix
Estimating condition number
Backwards substitution
Determination of the impedances and powers
Calculate the far field

Finished

OPTIMISATION WITH FEKO

Method: Raster-scan

Current variable values: #alfa = 4.0000000e+001

#a = 9.0000000e-001

Value of the aim function during analysis 400: -7.2067000e+000

Call of opt_rastersuche

Raster-scan finished

Resulting dest.vect: #alfa = -2.0000000e+001

#a = 7.0000000e-001

Minimal value of the aim function (at no. 1): -7.2067000e+000

no. of the last analysis: 400

IP - Specify the segmentation parameters

Radius of wire segment	<input type="text" value="#segrad"/>
Maximum triangle edge length	<input type="text" value="#lambda/5"/>
Maximum wire segment length	<input type="text" value="#lambda/10"/>
Maximum cuboid edge length	<input type="text"/>
Maximum tetrahedral edge length	<input type="text"/>

```
** Параметры оптимизации создаются OPTFEKO (#alpha и #a)
** Сначала проверим, были ли переменные определены и зада
!! If (not(defined(#a))) then
#a = 0.25
!! Endif
!! If(not(defined(#alpha))) then
#alpha = 30
!! Endif

** Сохранение параметров
#lambda = 1
#seglen = #lambda/10
#segrad = #lambda/1000
#side_1 = #lambda/5
```

Рис. 13.5. Задание параметров разбиения

SY - Specify symmetry of the geometry

Select symmetry for the plane x=0

None Electrical

Geometrical Magnetic

Select symmetry for the plane y=0

None Electrical

Geometrical Magnetic

Select symmetry for the plane z=0

None Electrical

Geometrical Magnetic

Label increment for the new structures

Note: For electric symmetry the tangential electric field is zero, while for magnetic symmetry the tangential magnetic field is zero.

Рис. 13.6. Задание симметрии в виде магнитной стенки

При решении задачи зададим параметры расчета, а также разбиения на сегменты (рис. 13.7) так же, как при анализе и моделирования структуры. Параметры дальнего поля будут запоминаться для каждой итерации, выполняемой при оптимизации или переборе параметров.

FE - Calculate the near fields

Electric field values ▼

Use old output format

Calculate only the scattered part of the field

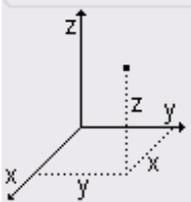
Coordinate system

Cartesian Cylindrical (y-axis)

Cylindrical Conical

Spherical Specified points

Cylindrical (x-axis)



Starting values

x

y

z

No. of points

x

y

z

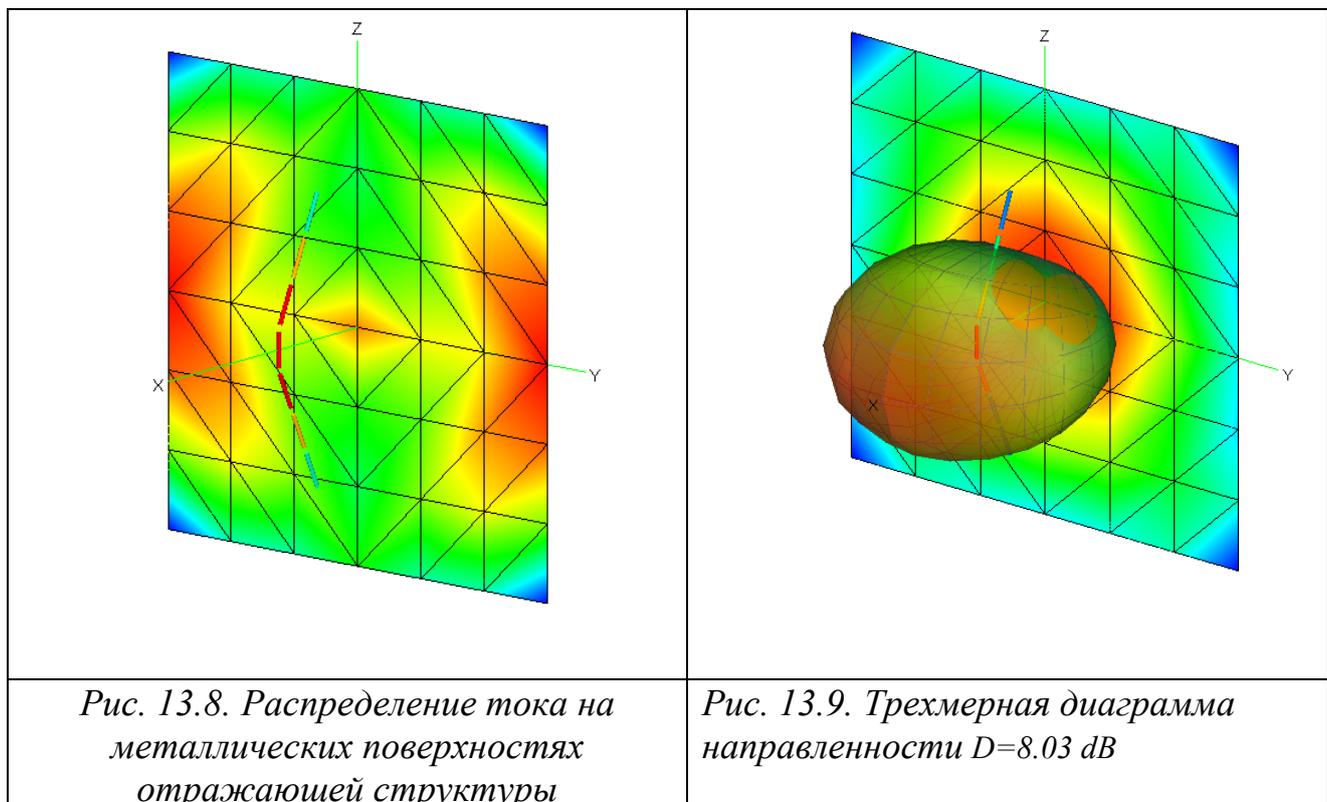
Increment

x

y

z

Рис. 13.7. Задание ближнего поля в плоскости



Результаты оптимизации в FEKO 5.2 извлекаются из файла с расширением .log.

Log файл

===== LOG - FILE - OPTFEKO =====

Version: 11.3 of 2006-02-15
Date: 2008-12-03 12:40:53
File: 20081203_Opt_vib

OPTIMISATION WITH FEKO

===== Optimisation variables =====

No.	Name	Beg.value	Minimum	Maximum
1	#alpha	-8.0000e+001	-8.0000e+001	8.0000e+001
2	#a	2.5000e-001	2.5000e-001	2.0000e+000

===== Optimisation method raster search =====

No.	Name	Quantity	Minimum	Maximum	Step
1	#alpha	10	-8.0000e+001	8.0000e+001	1.7778e+001
2	#a	5	2.5000e-001	2.0000e+000	4.3750e-001

===== Aim functions =====

Data follows for the 1 aim functions

===== Aim function Gain =====

Both polarisation direction are used.
Minimisation of the average over all blocks
1 blocks are read.
The gain in dB is calculated for every block.

Использованы оба направления поляризации
Минимизация среднего по всем блокам

Output

under 'Aim funct.':
the mean value of the given blocks,
under 'Other spec.' (only in LOG-file):
the block number and
the maximal value of the dynamic range.

Weighting factor of this aim function: 1.000000

===== Optimisation and Analysis =====

No.	#alpha	#a	Aim fct.	Other spec.
1	-8.0000e+001	2.5000e-001	2.5020e+000	1 2.5020e+000
.....				
50	8.0000e+001	2.0000e+000	1.9698e+000	1 1.9698e+000

Raster-scan finished

Result destination vector: #alpha = 8.0000000e+001
 #a = 6.8750000e-001
 Minimal value of the aim function (at no. 20): 6.8830000e-001
 no. of the last analysis: 50

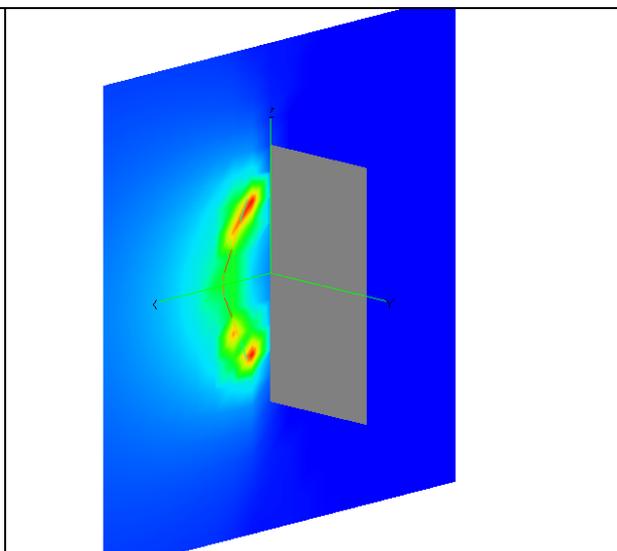
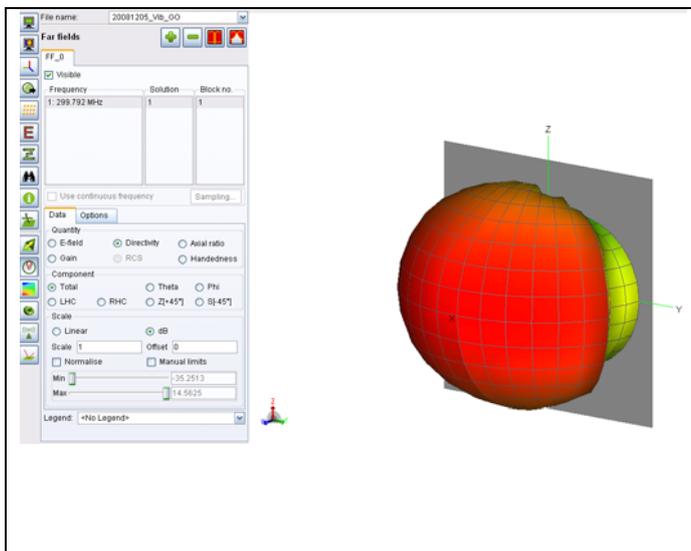


Рис. 13.11. Дальнее поле искривленного вибратора

Рис. 13.12. Ближнее поле в сечении антенны

Итак, в этом, заключительном разделе, было закреплены приемы, которые реализованы в программе FEKO версии 5.2 для выполнения оптимизации конструкции. В этом примере в качестве целевой функции были использованы характеристики дальнего поля. В качестве переменных оптимизации – угол перелома вибраторной антенны и расстояние антенны до плоскости отражения.

Заключение

В настоящее время можно сказать, что идея внедрения в процесс проектирования численных методов, реализованных на персональных компьютерах, получает все более полную реализацию.

К концу 20 века все методы решения получили достойное воплощение в программы ведущих компаний мира. Это программы HFSS, CST, MWO, ADS и другие. Выход на коммерческий уровень программы FEKO был несколько задержан потому, что она была реализована в виде набора карт, что затрудняло внедрение её в университетские курсы. Однако появление CADFEKO, а главное, мультипольного метода MFLMP, усилило интерес к этому комплексу. Поэтому внедрение в процесс обучения системы FEKO можно считать завершением важного этапа инженерного образования.

Программа FEKO уникальна тем, что освоение ее предполагает глубокое знание теоретической базы. Всё это ставит FEKO в лидирующее положение как в плане обучения, так и в плане внедрения в процесс производства.

Решение одной и той же задачи методами, принципиально отличающихся друг от друга, например с помощью метода конечных элементов (HFSS), метода FDTD (CST), метода моментов и методов геометрической оптики (FEKO), приводят нас к тому (если решение получаются близкими или точно равными), что чисто компьютерное моделирование – дает точное решение. Это, возможно, еще одно доказательство того, что мир устроен из одного центра, идеи создания мира принципиально переплетены и созданы по одним принципам. Надеемся, что решение разнообразных задач, которые приведены в данной книге, закрепит знания о современных методах проектирования, которые представлены в программе FEKO версии 5.2.

Литература

1. Сайт компании EMSS, разработчика комплекса программ FEKO www.emss.de
2. Сайт программы FEKO <http://www.feko.info>
3. **Банков С.Е., Курушин А.А.** Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – М., ЗАО «НПП «Родник», 2008. - 248 стр.
4. **Д.М. Сазонов, А.Н. Гридин, Б.А. Мишустин.** Устройства СВЧ. М., "Высшая школа", 1981, 295 стр.
5. **Баскаков С.И.** Основы электродинамики. М., «Сов.Радио», 1973, 248 с.
6. **Разевиг В. Д. , Потапов Ю., Курушин А.А..** Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. 2003, «Солон-Пресс», 600 стр.
7. Сайт официального дистрибьютера современного программного обеспечения компании АОА «Родник» www.rodnik.ru
8. Сайт дистанционного обучения проектирования и применения методов СВЧ <http://ipso.ioso.ru/distance>

Содержание

1. Введение.....	6
2. Моделирование пирамидальной рупорной антенны.....	9
3. Анализ планарной антенны.....	43
4. Анализ квадрифилярной антенны.....	59
5. Расчет связи между антенной и линией.....	71
6. Анализ металлического резонатора с узкой щелью	83
7. Расчет полуволновой вибраторной антенны.....	101
8. Вибраторная антенна над металлической платой, моделируемой методом дифракции.....	107
9. Вибраторная антенна перед плоскостью UTD.....	113
10. Рупорная антенна перед параболическим рефлектором.....	119
11. Расчет эффективной площади рассеяния ракеты.....	138
12. Оптимизация двухспиральной антенны в EDITFEKO.....	161
13. Оптимизация вибратора перед отражающей плоскостью.....	168
14. Заключение.....	178
15. Литература.....	179

Об авторах:

Банков С.Е. – д.т.н., Гл. научн. сотр. ИРЭ АН. Окончил РТФ Московского энергетического института в 1982 г, аспирантуру в 1985 г. Специалист в области диэлектрических волноводов, антенн, ведущий эксперт в области САПР СВЧ. Автор 10 учебных пособий и 300 научных статей.

Курушин А.А. – к.т.н., доцент каф. АУиРРВ МЭИ. Окончил РТФ МЭИ в 1979 г, аспирантуру в 1985 г. К.т.н. (1991 г.), диссертация «Проектирование транзисторных СВЧ усилителей с расширенным динамическим диапазоном». С 1996 г. преподавал различные аспекты СВЧ в МИЭМ, МИРЭА и МЭИ. Автор 10 учебных пособий и 70 научных статей.

