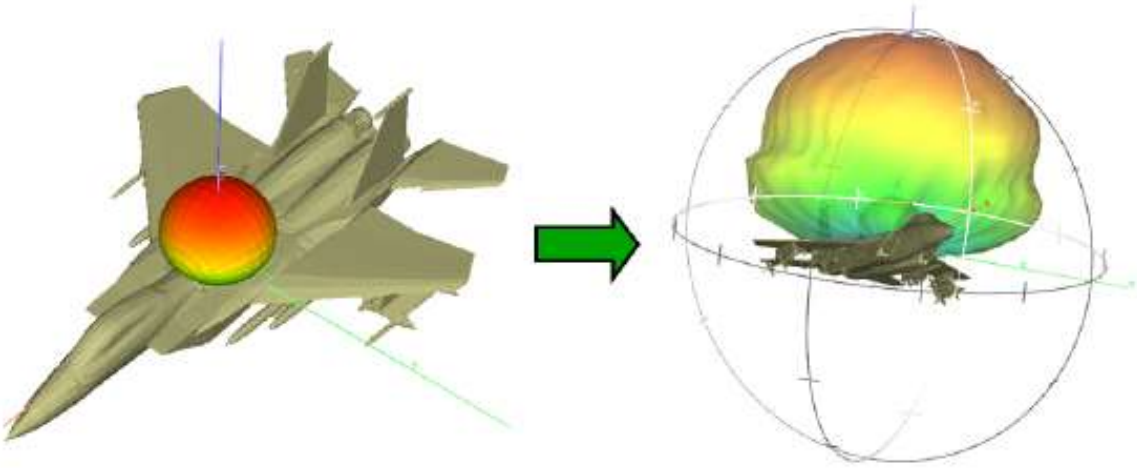
Грибанов А.Н., Кузнецов И.А., Курушин А.А.

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ в ANSYS HFSS



В программу ANSYS HFSS включена мощная утилита SAVANT, которая, используя асимптотические методы электродинамики, решает уникальные радиотехнические задачи.

Москва 2019

УДК 621.396.44

Грибанов А.Н., Кузнецов И.А., Курушин А.А. Асимптотические методы электродинамики в ANSYS HFSS. М., «One-Book», 2019, 340 стр.

Electromagnetic Asymptotic Methods in HFSS ANSYS. – ONE-BOOK, Moscow, 2019, 340 pp.

Рецензенты д.т.н. Банков С.Е., д.т.н. Коган Б.Л.

Методы геометрической, физической оптики, а также равномерной теории дифракции позволяют расширить возможности тестовой электродинамической системы ANSYS HFSS на моделирование антенных систем, размеры которых составляют десятки и сотни длин волн. Несколько подпрограмм добавлено в тестовую электродинамическую систему HFSS, в том числе программы Savant, EMIT и др. Предлагаемое учебное пособие основано на материалах Help, приложенных к программе и предназначено для начальных шагов освоения программы, студентами и специалистами СВЧ. Может служить хорошим дополнением к уже опубликованным книгам, посвященным САПР СВЧ.

УДК 621.396.44

ISBN 978-5-00077-878-4

© Грибанов А.Н.,
© Кузнецов И.А.,
© Курушин А.А.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....7
1.1 Исходные данные для программы Savant.....8
1.2 Результаты расчета Savant.....9
1.3 Savant с графической картой.....10
1.4 Интерфейс программы.....11
1.5 Организация дерева проекта.....15
1.6 Перевод информации и данных между узлами.....16
1.7 Панели свойств узлов и действий.....18
1.8 Общие свойства узлов.....19
1.9 Действия с моделями CAD.....22
1.10 Панель свойств CAD модели.....24
1.11 Узел параметрических моделей.....28
1.12 Опции сетки для сфер и эллипсоидов.....43
1.13 Узел покрытия.....43
2 Теория Savant.....54
2.1 Метод падающих и отраженных лучей.....54
2.2 Падающие и рассеянные поля.....54
2.3 Фазовое соотношение лучей.....55
2.4 SBR в определенных ограничениях.....55
2.5 Физическая и геометрическая теории дифракции.....56
2.6 Алгоритм SBR.....59
2.7 Моделирование источника лучей (антенна Tx).....61
2.8 Нормализация и масштабирование мощности.....63
2.9 Покрытие поверхности материалом.....66
2.10 Таблица коэффициентов отражения-передачи.....69
2.11 Коррекция сходимости лучей на искривленной поверхности.....71
2.12 Коррекция клиньев ФТД.....73
2.13 Лучи дифракции на ребрах в ОТД.....75
2.14 Моделирование методом SBR ползучих волн.....76
2.15 Узлы Wedges.....78
2.16 Панель свойств ребер.....83
3 Базовые операции Savant.....85
3.1 Начало моделирования.....85
3.2 Изменение угла просмотра модели.....88
3.3 Переименование узла.....89
3.4 Добавление короткой дипольной антенны к сцене проекта.....90
3.5 Установка метода расчета и частоты.....98
3.6 Запуск моделирования и вывод результатов расчета.....100
4 Источники тока. Нанесение на график и импорт результатов.....108
4.1 Загрузка выполненного примера 1.....109
4.2 Распределение тока в монопольной проволочной антенне.....110
4.3 Добавление и конфигурирование встроенной монопольной антенны..114

4.4 Проверка встроенной монопольной антенны 115
4.5 Перезапуск моделирования и нанесение результатов на график 119
4.6 Проверка источников тока используемых в моделировании 121
4.7 Нанесение на график результатов моделирования.....125
4.8 Экспорт графика в виде файла 131
4.9 Импорт результатов из примера 1 и сравнение его с полученными результатами.....131
4.10 Изменение параметров для создания многомерных графиков 135
4.11 Создание полярного графика.....138
5 Антенны на мобильных платформах.....140
5.1 Добавление другой плоскости в проект.....142
5.2 Модификация свойств модели CAD 143
5.3 Группирование моделей CAD 148
5.4 Добавление антенны к сцене 150
5.5 Запуск и просмотр лучей 152
5.6 Установка и запуск моделирования, вывод и показ результатов 153
5.7 Добавление в проект модели самолета 155
5.8 Группировка моделей CAD и добавление антенны к сцене 157
5.9 Запуск на расчет и сравнение результатов.....160
6 распределение ближнего поля и визуализация лучей в материалах 165
6.1 Загрузка модели окружающего пространства 166
6.2 Материал среды пространства антенны.....168
6.3 Загрузка ДН рупорной антенны 172
6.4 Определение сетки точек пространственного наблюдения 175
6.5 Рабочая частота и метод расчета.....177
6.6 Запуск моделирования и вывод результатов расчета.....178
6.7 Создание картины лучей и применение фильтров лучей 182
6.8 Применение фильтров SBR для просмотра лучей.....185
6.9 Использование плоскости сечения для просмотра интерьера области анализа 193
7 Электромагнитная совместимость.....195
7.1 Загрузка модели самолета E-2C, состоящей из фасок.....196
7.2 Задание свойств материала покрытия 198
7.3 Загрузка широкополосного источника антенны для монопольной антенны и размещение его на корпусе *E-2C* 204
7.4 Внесение антенны на поверхность самолета 207
7.5 Загрузка широкополосной ДН рупорной антенны и размещение ее в пространстве *E-2C*.....210
7.6 Выбор установок на анализ 212
7.7 Запуск на расчет и вывод результатов на график.....213
8 Коррекция расхождения лучей 217
8.1 Запуск проекта для фасетной модели CAD 218
8.2 Сравнение результатов.....219
8.3 Перезапуск результатов с выделением искривления поверхности 225

9 Моделирование ползучих волн 227
9.1 Установки проекта с ползучими волнами 227
9.2 Визуализация ползучих волн 229
9.3 Представление и моделирование с учетом ползучих волн 234
9.4 Сравнение результатов полученных методом SBR 235
10 Антенные решетки 236
10.1 Добавление прямоугольной антенной решетки к сцене 236
10.2 Задание возбуждения элементов антенной решетки 240
10.3 Установка расчетной частоты решетки 242
10.4 Реконфигурация расположения элементов антенной решетки для сохранения разностной ДН 244
10.5 Антенная решетка над земляной платой 246
10.6 Конфигурация области углов дальнего поля и установки на расчет антенной решетки 248
10.7 Запуск моделирования и вывод результатов 250
11 Моделирование антенны на корабле методом теории дифракции 254
11.1 Создание CAD модели состоящей из двух PEC плат 254
11.2 Размещение монопольной антенны сверху платы 259
11.3 Ручная настройка клиньев в модели CAD 261
11.4 Запуск моделирования и сравнение с результатами полно-волнового электродинамического расчета. 265
11.5 Запуск моделирования с лучами *UTD*, и вывод результатов 270
11.6 Визуализация лучей UTD 273
11.7 Исследование свойств лучей UTD на модели корабля 276
11.8 Задание параметров расчета без лучей UTD 279
11.9 Запуск расчета с включенными лучами *UTD*. 281
12 Импорт ближнего поля антенны 289
12.1 Загрузка и экспорт проекта в *Savant* 296
12.2 Генерация источников тока для антенны 302
12.3 Вставка щелевой антенны в самолет 305
12.4 Расчет ДН дальнего поля в двух сечениях и нанесение результатов на графики 313
12.5 Создание нового проекта Savant и вставка щелевой антенны 318
12.6 Ориентация антенны 320
12.7 Согласование плоской щели с кривизной цилиндра 321
12.8 Расчет ДН дальнего поля используя опцию ползущих волн 324
13 Работа программы в режиме изменения параметров 328
13.1 Настройка многошагового проекта 330
13.2 Добавление переменных в последовательность Multi-Run 330
13.3 Нанесение результатов на полярную систему координат 336
Заключение 339
Литература 340

Условные обозначения

CAD – Computer Added Design

ГО – геометрическая оптика

ФО – физическая оптика

ОТД – однородная теория дифракции

ГТД – геометрическая теория дифракции

HFSS – High Frequency Structure Simulation

CST MWS – Computer System Technics Microwave Studio

SBR - Shooting and Bouncing Rays – метод расчета и трассирования лучей

ЭМП – электромагнитное поле

ДН – диаграмма направленности

PEC – Perfect Electric Conductor

TE – поперечные электрические волны

TM – поперечные магнитные волны

GPU - graphics processing unit

EMI/EMC – электромагнитная совместимость

1 ВВЕДЕНИЕ

Программа **Savant**, которая вошла в последние версии ***ANSYS Electronics Desktop*** (***HFSS ANSYS)***, - это компьютерная программа [1] для расчета характеристик антенн, расположенных на самолётах, кораблях, спутниках, автомобилях, зданиях и других платформах (рис. 1.1). Программа рассчитывает:

- ДН и характеристики направленности в режимах на передачу и прием антенн, установленных на платформы,
- Распределение поля излучения в окружающем пространстве,
- Связь и развязку между антеннами, смонтированными на общей платформе или двух отдельных платформах.

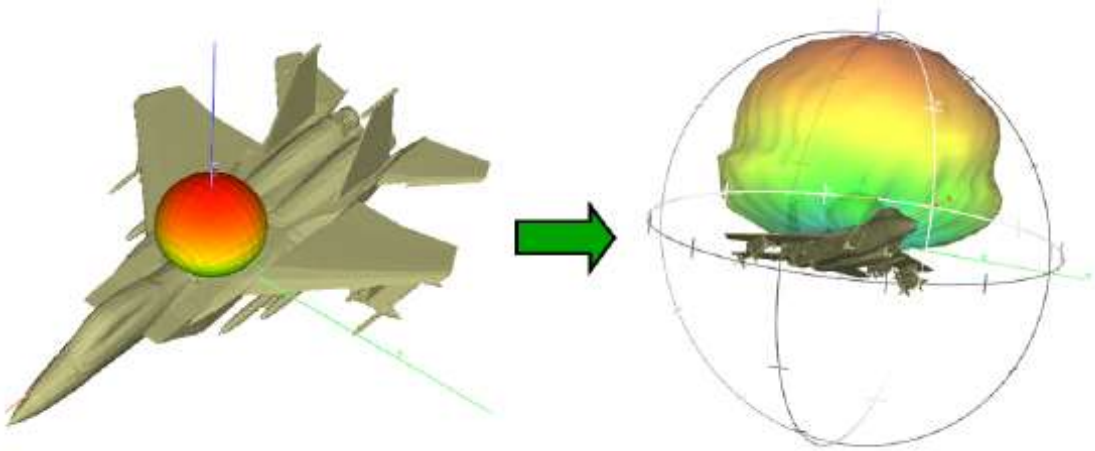


Рис. 1.1. Трехмерная ДН антенны на платформе

Программа электромагнитного моделирования Savant использует метод ***SBR*** (***Shooting and Bouncing Rays***). Метод ***SBR*** - это асимптотический СВЧ метод, который использует трассирование лучей для нахождения токов, наведенных на крупногабаритной платформе антенны. Эти токи затем создают поля излучения платформы (благодаря возбуждению, отражению и дифракции) в присутствии излучения антенны или связи между антеннами [2-4]

SBR использует многолинейные связи, основанные на геометрической оптике (ГО). ***SBR*** - это метод использования ГО [4-6] для эффективной реализации метода физической оптики (ФО) [7-9] для многократных лучей. Уникальность Savant состоит в дополнительных физических механизмах, которые можно выбрать для построения базового решения ***SBR***. Это:

- Распространение поверхностных волн от антенн, установленных на искривленной поверхности,

- Физическая теория дифракции (***PTD***) с коррекцией на металлических ребрах и вершинах,
- Однородная теория дифракции (***UTD***) с дифракцией лучей на ребрах.

1.1 Исходные данные для программы Savant

Исходными данными для моделирования является 3D геометрия мобильной платформы (один или больше CAD моделей). Эти геометрии (рис. 1.2) могут быть получены извне в виде файла CAD, в составе треугольных элементов или искривленных поверхностей в различных форматах: ***ACAD Facet (.facet)***, ***STL (Stereolithography) (.stl)***, ***Wavefront OBJ (.obj)***, ***GiD Mesh (.msh)***, и ***IGES (.iges, .igs)***. Эта платформа может быть импортирована из простого файла ***CAD***, объединяя несколько встроенных параметрических форм или комбинацией из импортированных ***CAD*** моделей и параметрических частей [10].

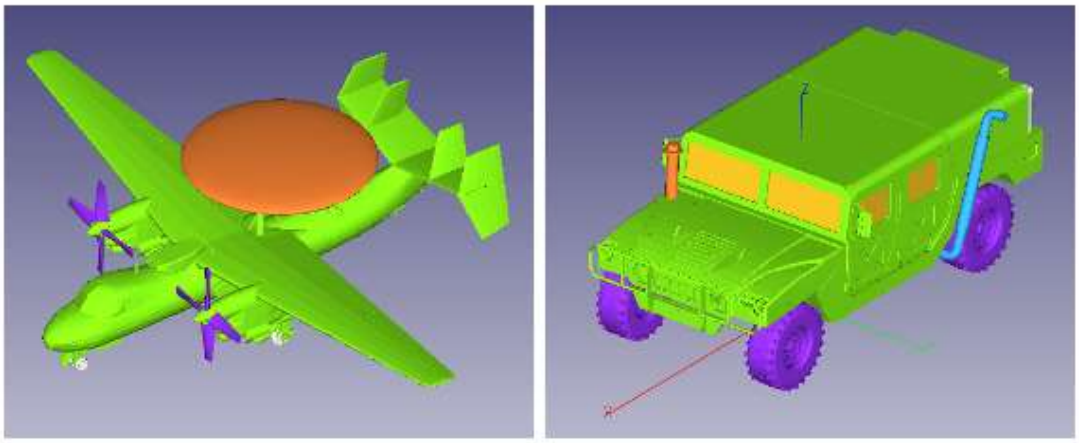


Рис. 1.2. Мобильные платформы (самолет, автомобиль), поверхности которых могут быть из различных материалов

Свободно устанавливаемые (изолированные) передающие (***Tx***) и приемные (***Rx***) антенны могут быть описаны в двух видах:

- ДН в дальней зоне как функция углов и частоты,
- Распределение физических или эквивалентных токов.

Это может быть также импортируемый файл или файл, сгенерированный по созданной антенне. Имеется несколько поддерживаемых собственных и внешних форматов *Savant*:

ДН в виде таблицы	.patdat
Список источников тока	.csrc
ANSYS Far-field Data	.ffd

CST Far-field Source	.ffs
WIPL-D Far-field Data	.ra1

Пользователь ***ANSYS Electronics Desktop*** и ***CST MICROWAVE STUDIO*** может также экспортировать данные ближнего поля после моделирования антенны и импортировать эти данные в ***Savant*** в виде ДН или эквивалентных токов (рис. 1.3).

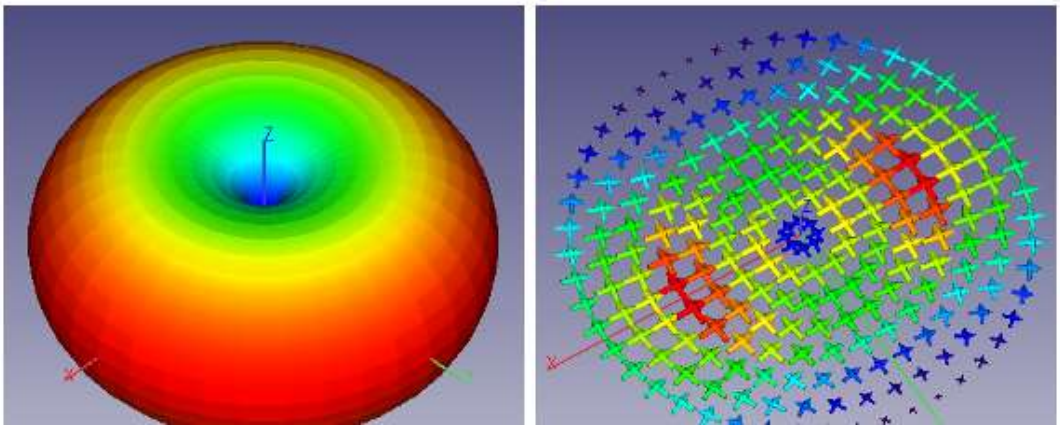


Рис. 1.3. Представление характеристик антенны в виде ДН в дальней зоне и эквивалентных токов в раскрыве антенны

Покрытия тонким материалом наносятся на поверхности как диэлектрические слои с заданной диэлектрической и магнитной проницаемостью, таблицей коэффициентов отражения от поверхности и коэффициентов передачи.

1.2 Результаты расчета Savant

В результате расчета на программе Savant могут быть получены:

- ДН в дальней зоне антенны ***Tx***, установленной на платформе,
- Ближние поля (E- и H) установленной антенны ***Tx***,
- Коэффициент связи между установленными ***Tx*** и ***Rx*** антеннами.

Savant может генерировать эти результаты на одной частоте, на дискретных частотах, или в диапазоне частот. *Savant* может также быть сконфигурирован для выполнения последовательности расчетов (т.е. выполнить параметрический анализ), где изменяются одна и большее количество переменных. Результаты показываются в *Savant* как цветные 3-D объекты и графики (рис. 1.4). Результаты сохраняются в табличном формате ASCII и могут быть импортированы.

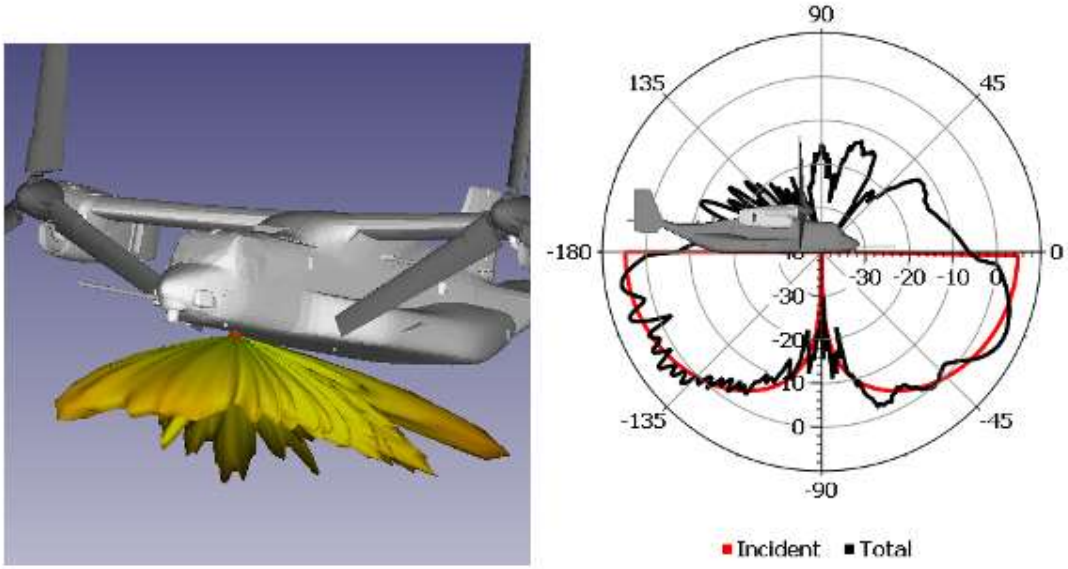


Рис. 1.4. Антенна на корпусе самолета; сечение ДН по падающим (Incident) и суммарным (Total) полям

1.3 Savant с графической картой

Savant с графической картой ***GUI (graphical user interface)*** значительно усиливает возможности программы и скорость расчета, алгоритм которой состоит из следующих шагов:

- Задание новых проектов.
- Выполнение моделирований.
- Вывод результатов анализа.
- Загрузка и сохранение проектов и архивированных проектов.

Работа в *Savant* выполняется в дереве проекта, в котором имеется большие возможности визуализации структуры задачи, падающих и отраженный лучей от поверхностей, лучей дифракции от ребер (в методе ***UTD***). Как трехмерные визуализации, так и графики имеют возможности для обогащения информацией, печати, экспорта в виде файлов изображений, а также копирования и вставки в другие программы.

Существует также серверное приложение *Savant*, запускаемое из командной строки без графического интерфейса. Оно доступно для выполнения отдельных проектов *Savant* в фоновом режиме или пакетного выполнения нескольких проектов.

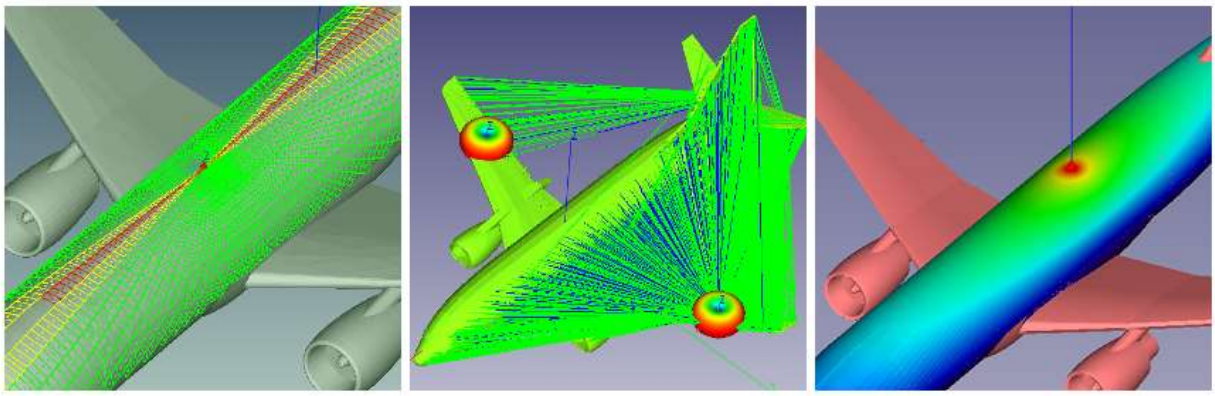


Рис. 1.5. Лучи геометрической оптики и токи на поверхности

1.4 Интерфейс программы

Графический пользовательский интерфейс программы *Savant* (рис. 1.6) используется для создания новых проектов, запуска моделирования и отображения данных проекта и результатов расчета. Интерфейс *Savant* имеет следующие основные компоненты:

- Главное меню.
- Инструментальные линейки.
- Дерево проекта.
- Узел панели свойств.
- Окна визуализации и графиков.

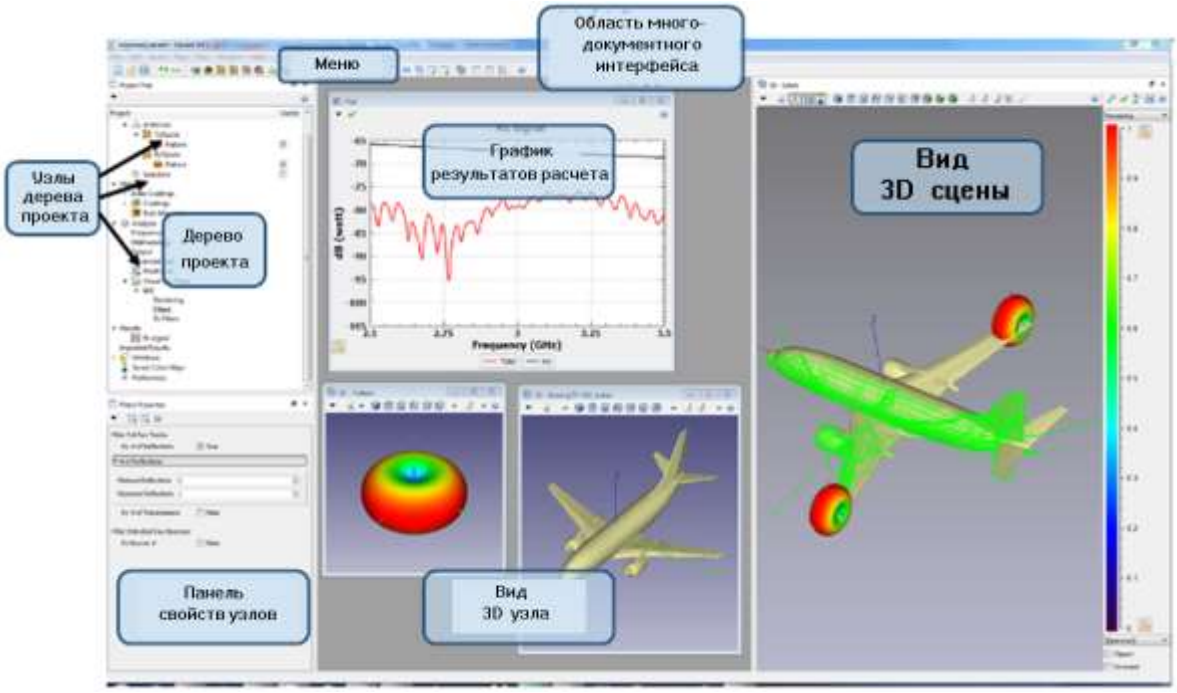


Рис. 1.6. Интерфейс программы Savant

Savant использует многооконный интерфейс для одновременного отображения различных компонентов. Окна могут быть настроены так, чтобы оставаться в фиксированном положении ("закреплены") или быть "плавающими".

Дерево проекта (***Project Tree***) в ***Savant*** используется для объединения различных компонент проекта в иерархическом порядке. Дерево состоит из узлов (***Nodes***). Свойства, связанные с каждым узлом, доступны через панель свойств узла. Щелчок правой кнопкой мыши по узлу открывает всплывающее меню с действиями, связанными с этим узлом, такими как загрузка файла, создание под-узлов, запуск на расчет или визуализация данных. Двойной щелчок на узел выполняет действие по умолчанию для данного узла.

Панель свойств (***Property Panel***) находится под деревом проекта и в нём пользователь указывает параметры для выбранного узла. Панель свойств изменяется в зависимости от того, какой узел выбран в дереве, чтобы показать только параметры, относящиеся к этому узлу. В верхней части панели свойств расположена панель инструментов. Кнопки действий на панели инструментов идентичны кнопкам, доступным при щелчке правой кнопкой мыши по узлу дерева. Некоторые панели свойств имеют метки, которые отображаются в виде кнопок. Это развернутые папки панели свойств, содержащие дополнительные параметры для узла. Нажмите на кнопку метки, чтобы развернуть/свернуть папку и показать/скрыть параметры, которые она содержит.

Следующие типы окон можно вывести, а также создать несколько одновременно:

- ***3D-Scene*** – окно в *Savant*, которое показывает физическую топологию и компоненты анализируемой системы. Дважды нажмите на узел ***Scene*** в дереве проекта для создания окна ***3D-Scene*** для просмотра сцены;
- ***3D-<имя узла>*** - многие узлы в дереве проекта имеют 3-D представление, которое можно видеть в собственном 3-D окне. Это включает следующие узлы:
    - ***CAD-Model*** - узел (который содержится в узле ***Scene***) - показывает модель CAD;
    - ***Wedge*** - узел (которое содержится в узле ***CAD-Model***) - показывает ребра в модели ***CAD***;
    - **Antenna** - узел (которые содержатся в узле ***Scene***) – показывает ДН антенны или источник распределенного тока;
    - ***Far-Field*** - показывает углы, в направление которых выполняется расчет дальнего поля;

- ***Far-Field*** **result** – показывает результаты расчета дальнего поля;
- ***Near-Field*** **domain** – показывает точки ближнего поля;
- ***Near-Field*** **result** - показывает результаты расчета ближнего поля;
- ***Visual Ray Trace*** - показывает лучи.

Если 3D-представление узла существует, его можно увидеть при помощи перетаскивания узла в область многодокументного интерфейса (***MDI***), или визуализировать, выбирая из контекстного меню "View".

Например, двойной щелчок по узлу антенны ***Antenna1*** открывает окно просмотра ***3D-Antenna 1***, чтобы отобразить именно эту антенну, а не какую-то другую из других элементов сцены.

Панели свойств узлов включают в себя элементы управления для точной настройки отображения компонента в 3-D окне. Узлы ***Far-Field/Near-Field*** являются исключением из этого правила. Просмотр дальнего и ближнего поля управляется из узлов ***Far-Field*** и ***Near-Field*** под узлом ***3-D Windows***.

Результаты расчета могут быть показаны в прямоугольной и полярной системе координат. Они могут быть созданы двойным нажатием на узел результата. Для проекта, заполненного результатами моделирования, узел ***Results*** будет содержать один или несколько узлов результатов, а двойной щелчок на узле ***Results*** выведет окно графика. Результаты, импортированные из других проектов **Savant**, также отображаются в узле ***Results***. Перетаскивание узла результатов в существующее окно графика добавляет его на график, позволяя сравнивать результаты между проектами.

1.4.1 Меню Insert

В меню "***Insert***" можно добавить объекты в проект (рис. 1.7).

- **Add CAD...** – загружает файл ***CAD-Model*** и помещает его в узле ***Scene***.
- **Add Parametric CAD** – добавляет узел ***Parametric CAD-Model***.
- **Add Antenna** - добавляет узел Antenna.
- **Add Antenna from File...** – загрузка файла ***Antenna***. Поддерживается несколько форматов импорта: ***antenna pattern table (.patdat)***, список источников тока (***.csrc***), данные дальнего поля ***ANSYS (.ffd), .ffs,*** и ***.ra1)***.

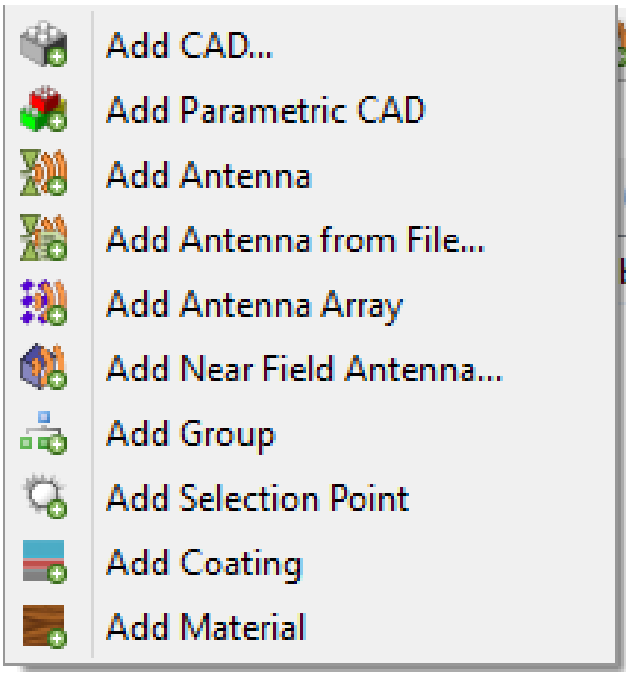
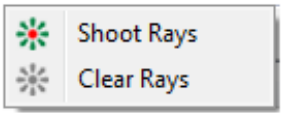


Рис. 1.7. Команды добавления компонент проекта

- **Add Antenna Array** – добавление узла антенной решетки
- **Add Near Field Antenna...** - загрузка данных ближнего поля экспортированных из ***ANSYS HFSS*** или ***CST MWS*** и добавление его как узел ***Near Field Antenna*** в узел ***Scene***.
- **Add Group** - добавление узла группы ***Scene Group***.
- **Add Selection Point** - добавление узла выбранной точки.
- **Add Coating** - добавление узла ***Coating,*** который используется для покрытия поверхности ***CAD***-модели, используя узлы ***Coat Index***.
- **Add Material** - добавление узла материала ***Bulk Material***, который используется в нескольких узлах ***Coating***.

1.4.2 Меню лучей

В меню ***Rays*** предусмотрены действия по запуску и очистке видимых лучей. Трассировка лучей и основное моделирование являются независимыми действиями, хотя трассировщик визуальных лучей также отражает геометрические компоненты прочерчиваемых лучей нажатием на Shoot Rays:.



Выполняются две операции:

- **Shoot Rays** - запуск и показ лучей от текущей точки излучения.
- **Clear Rays** – снятие всех показанных лучей.

1.4.3 Меню Run

Меню ***Savant Run*** обеспечивает действия для запуска моделирования и удаления результатов расчета.

- **Run Analysis** - запуск на расчет текущего сконфигурированного проекта, с сохранением или без сохранения результатов расчета в папках проекта.
- **Run and Save** – запуск на расчет текущего проекта и затем сохранение конфигурации и результатов в дереве проекта.
- **Purge** - очищение результатов текущего моделирования из памяти, но без пере-сохранения проекта. Текущие результаты, сохраненные в папке проекта, могут быть восстановлены, если проект повторно загружен без сохранения проекта после очистки. Эта операция очищает только текущие результаты моделирования. Сохраненные результаты и импортированные результаты остаются неизменными. Сохраненные и импортированные результаты можно удалить из проекта, удалив соответствующий узел ***Result***.

1.4.4 Дерево проекта и панель свойств

Дерево проекта является основной организационной структурой для создания и управления проектами ***Savant***. Оно состоит из иерархической последовательности узлов и имеет панель свойств, которая по умолчанию отображается непосредственно под деревом. Система многодокументного интерфейса разрешает изменение размещения по умолчанию для дерева проекта и ***Node Property Panel***. Панель свойств изменяется в зависимости от того, какой узел выбран в дереве и содержит параметры, относящиеся к этому узлу.

1.5 Организация дерева проекта

Все проекты ***Savant*** содержат узлы (рис. 1.8). Узлы, изображенные в виде папок, являются сборными узлами в иерархии и их можно развернуть и свернуть. Новый компонент узлов проекта, такие как модели ***CAD***, покрытия, антенны, результаты расчета и т. д. можно добавить в настройки проекта. Узлы результатов создаются автоматически после завершения

моделирования. Окна узлов создаются, когда 3D вид и графики добавляются в область интерфейса.

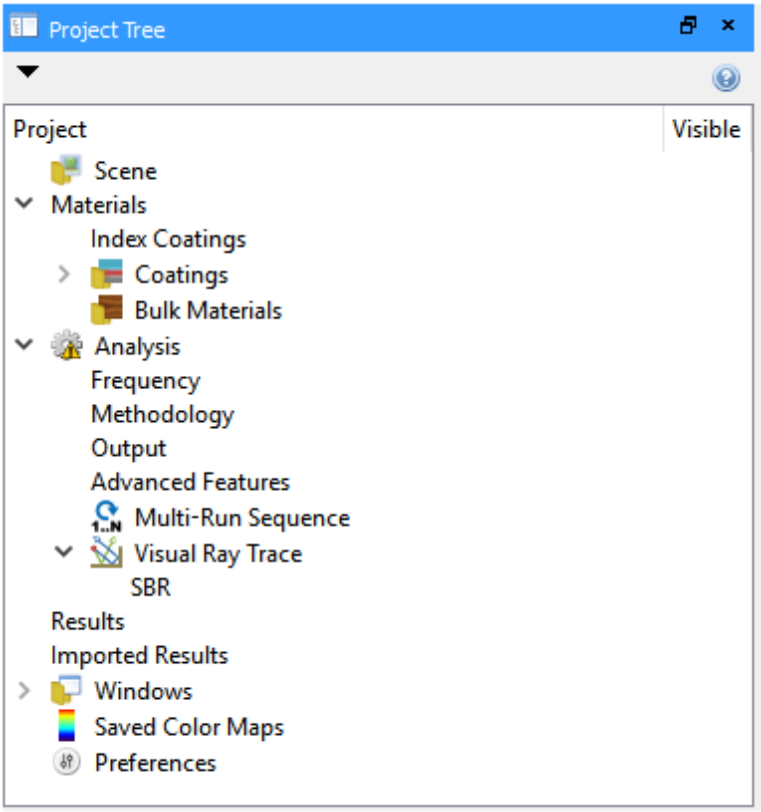


Рис. 1.8. Дерево проекта ***Savant***

Столбец справа от дерева проекта обозначается ***Visible*** и может быть использован для показа или скрытия узлов во всех 3-D окнах.

1.6 Перевод информации и данных между узлами

Некоторые типы узлов (рис. 1.9) можно перетаскивать в различные места дерева или в область интерфейса. Содержание некоторых узлов можно переорганизовать путем перетаскивания дочерних узлов в дереве проекта. Например, таким путем могут быть переорганизованы узлы ***Layer*** под узлом ***Coating***.

Другие типы узлов, которые также могут быть перетаскиваться – это узлы ***CAD-Model, Antenna, Scene Group, Coating, Bulk Material, Plot-Trace, Marker, Image, Far-Field (render), и Near-Field (render)***.

Узлы ***Coat Index*** можно перетаскивать только из узла ***Coating*** к другому узлу. Узлы ***Coat Index*** не могут быть переупорядочены под узлами ***Index Coatings***, так как они должны быть численно упорядочены по индексу.

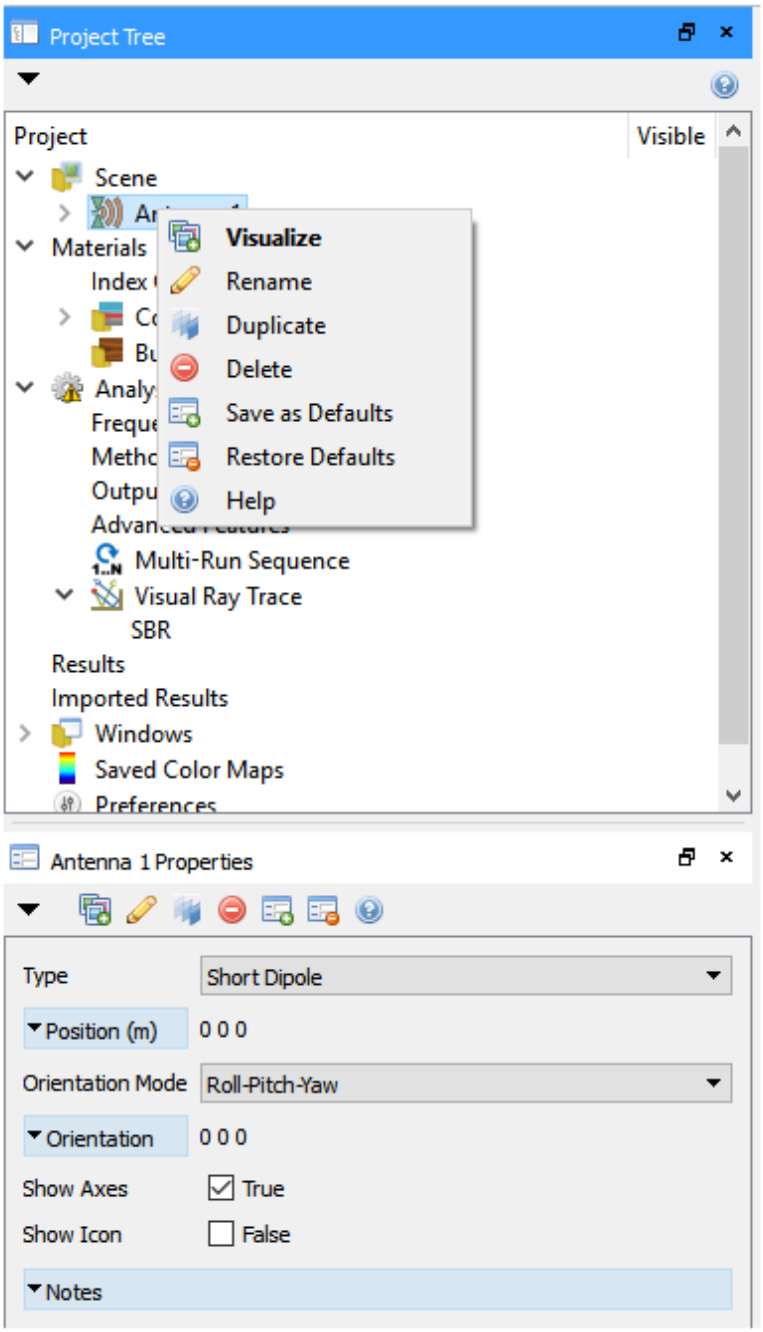


Рис. 1.9. Операции в дереве проекта и в папке свойств узла

Узлы результатов (***Far-Field*** или ***Near-Field***) можно перетаскивать на графическое окно, чтобы добавить характеристику на график результатов, или в многодокументный интерфейс для создания нового графика. Они могут быть также перетаскиваться на окно **3-D Window** для создания результатов в цвете.

Дерево проекта и узлы панели свойств сами могут быть перемещены и добавленные в главном окне графического интерфейса *Savant* путем перетаскивания.

1.7 Панели свойств узлов и действий

Каждый узел в дереве проекта имеет панель свойств ***(Property Panel)***, который содержит все параметры узла. Действия для каждого узла доступны щелчком правой кнопкой мыши на узле в дереве проекта, которое открывает всплывающее меню рядом с узлом. Эти же действия также доступны с панели инструментов в верхней части панели свойств (показано на рис. 1.10 для узла антенны с именем **Antenna 1**). Двойной щелчок в дереве проекта выполняет действие **boldface** в контекстном меню (например, действия **Visualize**).

1.7.1 Панель свойств

Следующие действия доступны через панель инструментов отображения ***Display Toolbar***. Для доступа к этой панели инструментов щелкните стрелку вниз, расположенную в верхней левой части каждой панели свойств в области представления. Исключение составляет только действие справки, расположенное в правой верхней части области окна просмотра.

Dockable	Закрепление состояния панели
Full Screen	Переключение между прямоугольным и полным экраном
Make a Static Copy	Создание синхронной копии панели свойств. Этот контекст для дубликата является статическим (конкретно для выбора узла дерева проекта)
Save Snapshot...	Представление захвата изображения панели свойств и сохранение его в файл
Copy Snapshot	Захват изображения и копирование его в клипборд
Print...	Захват изображения на панели свойств и печать его

1.7.2 Папки панели свойств

Некоторые панели свойств содержат разворачиваемые папки, позволяющие скрывать разделы панели для компактности. Чтобы развернуть/свернуть папку, нажмите на кнопку папки на панели свойств. В приведенном ниже примере панель ***Position*** была развернута для редактирования координат положения антенны (рис. 1.10).

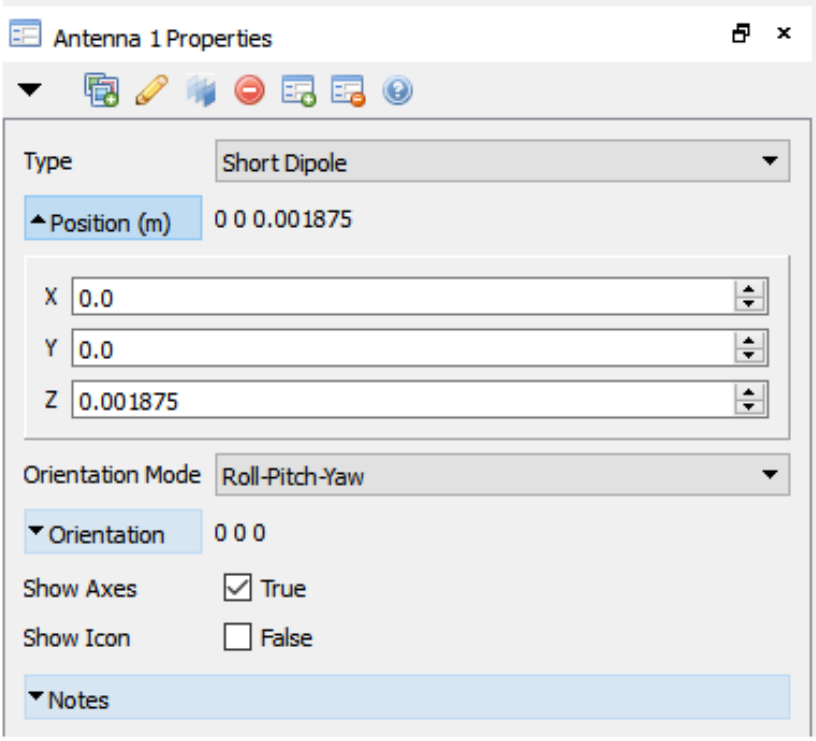


Рис. 1.10. Положение и ориентация узла

1.8 Общие свойства узлов

Многие узлы включают действие ***Save As Defaults***. При запуске текущие параметры на панели узлов будут сохранены в качестве параметров по умолчанию для этого типа узла. Это пользовательские значения по умолчанию, которые сохраняются между сеансами *Savant*. Всякий раз, когда этот тип узла создается в дереве, его начальные настройки будут соответствовать этим сохраненным значениям по умолчанию.

Это свойство можно использовать для настройки типов анализа по умолчанию, углов наблюдения за дальним полем и масштабирования графиков.

Но только некоторые настройки узла будут сохранены по умолчанию. Независимо от того, будет ли параметр сохранен с настройками по умолчанию узла, в подсказке параметра добавляется текст, который отображается только для настроек, узел которых поддерживает действие ***Save As Defaults.***

Команда **Restore Defaults** восстанавливает исходные установки для этого типа узла. Действие ***Restore Defaults*** приводит к заполнению нового узла заводскими данными, но не влияет на параметры существующих узлов. Чтобы удалить все сохраненные пользователем значения по умолчанию во

всех узлах, выберите пункт ***Restore Node Defaults*** в меню ***Edit*** из главного меню для восстановления значений по умолчанию.

1.8.1 Узлы моделей CAD

При загрузке файла модели ***CAD***, *Savant* создает узел ***CAD***-модели для настройки установки, ориентации и визуализации ***CAD***-модели (рис.1.11).

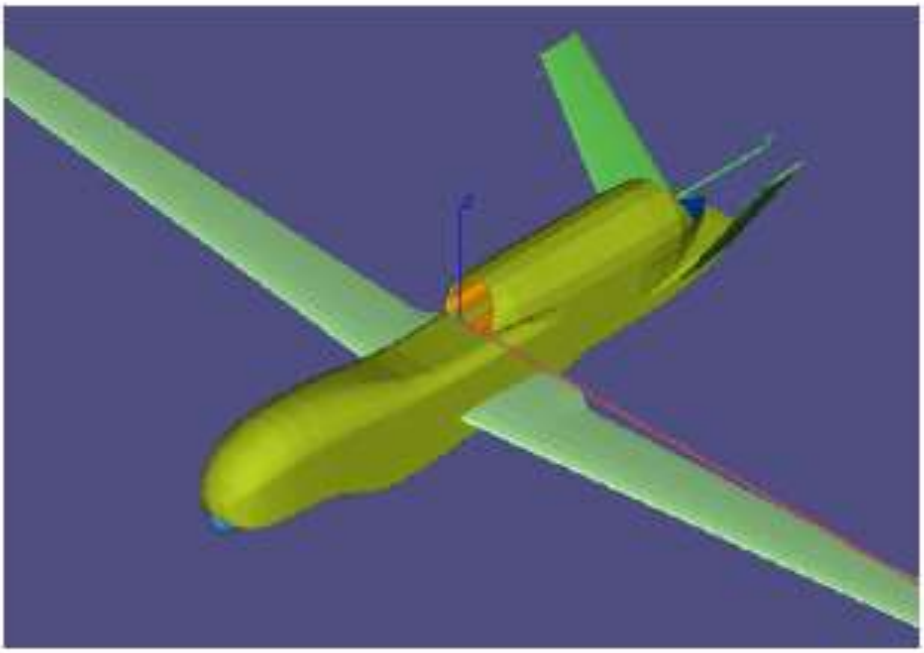


Рис. 1.11. Модель, созданная в Savant

Проекты в *Savant* могут содержать несколько моделей ***CAD***. Каждая модель *CAD* может быть смещена и повернута относительно системы координат родительского узла. Во время моделирования, трассировка лучей выполняется на основе композиции всех моделей, содержащихся в узле ***Scene***, включая модели, содержащиеся в узлах ***Scene Group*** внутри него.

Узлы ***CAD***-модели импортируются из файлов ***CAD***, которые, с точки зрения ***Savant***, поставляются в двух основных разновидностях

1. Разбитая на фаски, грани (треугольная сетка): ***Facet, GiD Mesh, Wavefront OBJ, STL, WIPL-D IWP***, и ***Parametric CAD-Model***.
2. Модели с расширением ***.iges, .igs***.

В узле ***Scene*** вы можете смешать одни фасеточные модели с другими фасеточными (гранеными) моделями, и вы можете смешать модели ***IGES*** с другими моделями. Однако нельзя смешивать **(**ограничение, **Restriction)** фасеточные модели и модели ***IGES*** в рамках одного проекта. Это потому, что у них принципиально разные структуры данных и необходимо, в ходе

моделирования, выполнить сборку модели ***CAD*** в одну композитную. Если вы попытаетесь нарушить это ограничение, скажем, добавив модель в формате ***iges***, когда есть уже граненая модель в рамках проекта, ***Savant*** будет выдавать сообщение об ошибке и прервет загрузку модели в формате ***iges***.

Чтобы добавить модель ***CAD*** в проект ***Savant***, выберите команду ***Add CAD...***. После выбора файла ***CAD*** для импорта из результирующего браузера файлов будет создан и вставлен новый узел ***CAD-Model*** под узлом, откуда было инициировано действие; если действие инициировано из главной панели инструментов, то оно вставляется под узел сцены. Узел ***CAD***-модели имеет такое же имя, как ***CAD***-файл (без расширения). Если один и тот же файл ***CAD*** загружается несколько раз, то вместо него дублируется узел, созданный для хранения исходного импорта, и новый узел будет переименован.

Узлы ***CAD***-моделей можно перемещать в дереве сцены (т. е. в любом месте под узлом сцены) путем выбора и перетаскивания узла в дереве проекта. Целевым объектом таких операций перетаскивания могут быть только узлы ***Scene*** и ***Scene Group***. Узлы ***CAD***-модели также можно напрямую дублировать с помощью действия ***Duplicate***, и это будет полезно при наличии повторяющихся частей в сцене.

Узел ***CAD***-модели может иметь дочерний узел для ребер ***Wedges***, связанных с моделью ***CAD***, которые необходимы для учета дифракции на краю. Внутренне, как и с моделью узлов ***CAD***, ***Savant*** также объединяет различные узлы ***Wedge*** при моделировании.

1.8.2 Единицы CAD модели

Большинство форматов файлов ***CAD***, поддерживаемых *Savant*, не содержат информации о единицах длины, которая должна применяться к модели. При импорте одного из этих файлов САПР *Savant* предложит пользователю указать единицу длины, используемую для файла ***CAD***, через всплывающее диалоговое окно. Диалоговое окно отображает размеры (длина, ширина и высота) ***CAD***-модели (рис. 1.12). Затем пользователь может выбрать единицы измерения, используемые в файле и файл ***CAD*** автоматически масштабируется до метров при импорте в ***Savant***. Если ***CAD***-модель уже использует свои единицы длины, пользователь может выбрать **'meters'** и нажать "***OK***", или просто нажать "***Cancel***", чтобы избежать операции масштабирования. После импорта в *Savant* модель ***CAD*** будет представлена в метрах при сохранении в проекте *Savant* (рис. 1.12).

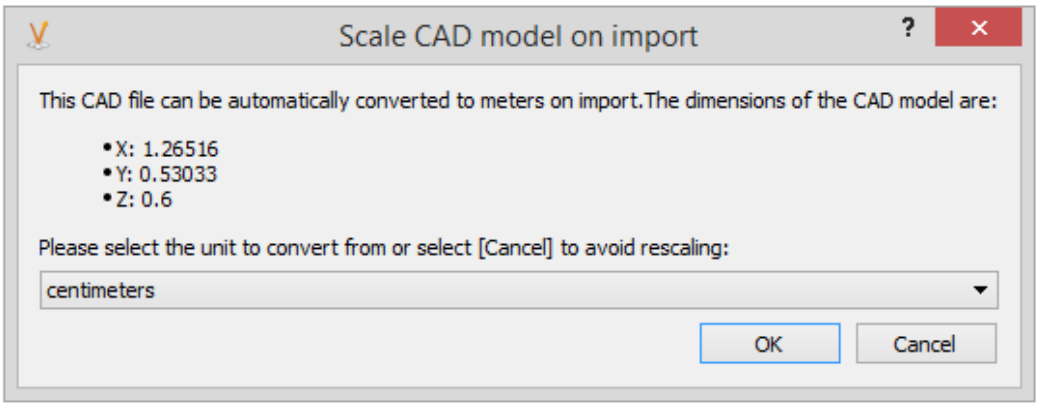


Рис. 1.12. Перевод единиц длины из одного значения в другие

В настоящее время, только файлы ***iges*** поддерживаются Savant, которые включают внутреннее задание единиц длины, что относится к модели. Savant считывает поле единицы измерения в заголовке ***IGES*** и автоматически масштабирует модель ***CAD*** от исходных единиц измерения до расчетных при загрузке файла.

1.9 Действия с моделями CAD

Следующие действия доступны при щелчке правой кнопкой мыши по узлу ***CAD***-модели, а также на панели свойств.

Visualize	Вывод ***CAD*** модели в новом окне ***3D***
Add Wedges	Создание узлов ***Wedges*** для включения дифракции на ребрах в процесс моделирования
Export CAD...	Экспорт (возможно с модификацией) ***CAD*** модели в файл в локальных координатах (игнорируя ***Position*** и ***Orientation***)
Rename	Переименование узла ***CAD-Model*** (но не его файла) в дереве проекта
Duplicate	Создание дублированного узла ***CAD*** модели
Delete	Удаление узла ***CAD*** модели
Save as Defaults	Сохранение текущих установок по умолчанию для узла ***CAD***-модели
Restore Defaults	Восстановить заводские настройки для узла ***CAD***-модели

Help	Справка

1.9.1 Действия по выбору и размещения CAD модели

Часто необходимо разместить одну CAD модель на поверхности другой CAD модели. Для интерактивного изменения положения выбранного узла ***CAD-Model*** выполните следующие действия:

Убедитесь, что кнопки ***Place Object, Place Object Tangent to Surface***, или ***Place Object Oriented toward Camera*** нажаты в инструментальной линейке **3D Window Selection Toolbar**.

- ***Place Object*** – размещает *CAD* модель без изменения её ориентации относительно глобальной системы координат
- ***Place Object Tangent to Surface*** – размещение ***CAD*** модели и вращение её z-оси так, что она стала перпендикулярна поверхности
- ***Place Object Oriented toward Camera*** - размещение ***CAD*** модели и вращение её так, чтобы её z-ось указывала прямо текущую точку наблюдения.

Итак, наведите указатель мыши в окне ***3D-Scene*** на поверхность модели ***CAD***, на которой требуется разместить модель ***CAD***.

Выберите поверхность: удерживая нажатой клавишу ***Ctrl*** и щелкнув левой кнопкой мыши. Модель ***CAD*** должна перейти к этой точке. Центр нижней грани (***zmin***) ограничивающего поля модели ***CAD*** переместится в выбранную точку. Свойство размещения узла ***CAD***-модели немного отличается от других типов узлов, обычно это начало системы координат узла, который перемещается в выбранную точку.

После того, как ***CAD***-модель будет примерно помещена таким образом, её точное размещение должно быть точно настроено с помощью параметров ***Position*** и ***Orientation*** в узле ***CAD***-модели. Действие размещения приведет к тому, что система координат будет помещена и согласована с обновленной системой координат узла ***CAD-Model***. Это также приведет к включению функции ***Show Relative Coordinates***. Таким образом, система координат узла ***CAD***-модели будет отображаться и редактироваться относительно координат размещения, а не координат родительского узла. Это часто удобнее для последующей тонкой настройки.

***Problems with interactive selecting and placement*:** Существует несколько известных проблем с размещением объекта "точка-и-щелчок" (и, в целом, с выбором в трехмерных окнах просмотра):

- ***Savant*** может «запутать» в действиях выбора, если открыто больше чем одно 3D окно. Если выделение (размещение модели ***CAD***) не работает, попробуйте закрыть все окна трехмерного просмотра, а затем открыть главное 3D окно, дважды щелкнув на узле сцены (или на главной панели инструментов).
- Иногда действия выбора требуют два или более щелчков мыши. Если вы наблюдаете такое поведение, попробуйте увеличить масштаб на части модели ***CAD***, где вы хотите разместить модель ***CAD***.

1.10 Панель свойств CAD модели

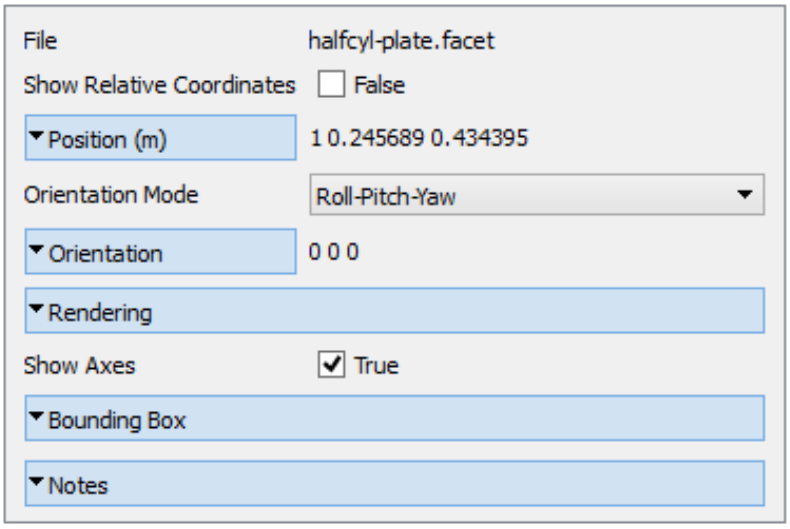


Рис. 1.13. Панель свойств CAD модели

***File*:** файл *CAD* модели.

***Show Relative Coordinates*:** Включение или отключение относительной системы координат.

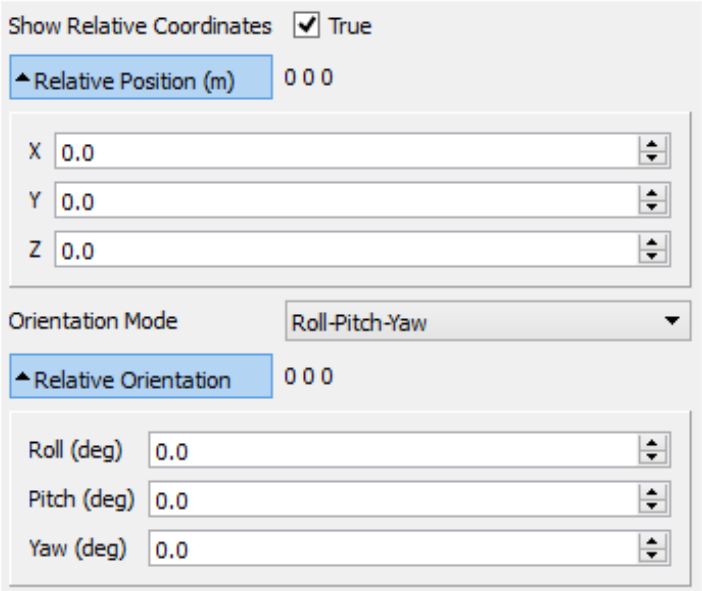


Рис. 1.14. Переключение папки в режим относительных координат

Эти установки не доступны, пока модель не была размещена интерактивно в первом приближении. При включении этой опции в ***Position*** и ***Orientation***, папки панели переименуются в ***Relative Position*** и ***Relative Orientation***. Теперь они указывают положение и ориентацию модели ***CAD*** (т. е. систему координат узла ***CAD***-модели) относительно координат размещения. При отключении этих режимов, папки панели возвращаются к исходным меткам и указывают систему координат модели ***CAD*** относительно системы координат родительского узла.

Основное преимущество включения функции ***Show Relative Coordinates*** заключается в том, чтобы обеспечить численно точную настройку положения и ориентации модели ***CAD*** в более удобной системе координат, чем в глобальной системе координат.

Координаты размещения устанавливаются и обновляются всякий раз, когда выполняется действие размещения ***CAD***-модели. Для всех трех режимов размещения, размещения действий определяет начало координат обоих размещений, и узел координат ***CAD***-модели в точке смещения от выбранной точки на поверхности, например, что центр нижней грани (z_{min}) из ***CAD***-модели ограничивающего прямоугольника находится в выбранной точке. После этого координаты модели ***CAD*** можно подстроить относительно координат размещения. В таблице ниже объясняется поведение координат размещения и координат модели ***CAD*** по отношению к новым координатам размещения сразу после действия размещения.

Режим размещения	**Ориентация координат размещения *(Placement Coords.Orientation)***	***CAD-Model Rel.Position***	***CAD-Model Rel.Orientation (Roll, Pitch, Yaw)***
Place Object	Выравнивание координат с предыдущей моделью CAD	(0,0,0)	(0,0,0)
Place Object Tangent	*z* перпендикулярна к плоскости	(0,0,0)	(0,0,0)
Place Object toward Camera	*z* по направлению к камере	(0,0,0)	(0,0,0)

Если представлен обычный ***Place Object***, то координаты размещения выравниваются с текущими координатами ***CAD-Model***. Это означает, что ориентация модели ***CAD*** остается неизменной, но её относительная ориентация (Крен, Тангаж, Рыскание) становится ***Roll, Pitch, Yaw*** = (0,0,0).

Координаты размещения явно никогда не показываются в панели узла ***CAD***-модели или в 3-D окне. Они существуют внутри инструмента и концептуально полезны для понимания преимуществ относительных координат.

Position: Установите позицию (***origin***) узла ***CAD-Model*** координатной системы.

В свернутом состоянии папка панели ***Position*** показывает текущее местоположение модели ***CAD*** в сцене относительно системы координат ее родительского узла.

Разверните папку панели ***Position***, чтобы изменить положение. Кроме того, можно интерактивно разместить модель ***CAD*** на поверхностях платформы с помощью операций "точка-щелчок". После размещения методом «точки-щелчка», рекомендуется точно настроить положение модели ***CAD*** путем непосредственного редактирования её положения ***Position*** (рис. 1.15).

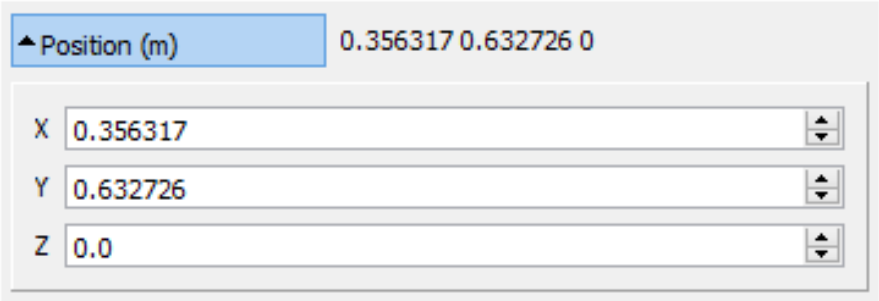


Рис. 1.15. Координаты положения точки

При включении опции ***Show Relative Coordinates***, папка панели ***Position*** становится ***Relative Position***, а позиция задается относительно координат размещения вместо системы координат родительского узла модели ***CAD***.

***Orientation Mode*: -** выбор режима для указания ориентации системы координат (порядок вращений).

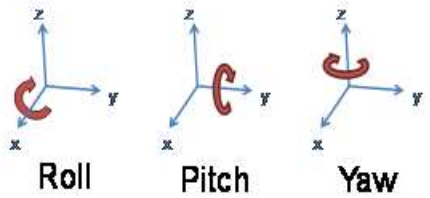
Ориентация системы координат узла определяется тремя левосторонними углами поворота, по одному около каждой принципиальных осей. Они вводятся и проверяются с помощью папки панели ***Orientation***.

Savant поддерживает два различных соглашения, которые различаются по порядку ***(Order)***, в котором применяются вращения (оба в левую сторону).

Когда требуется два или несколько оборотов, то один из этих двух преобразований часто будет более удобным, чем другие. В следующем описании "опорные координаты" означают одну из двух вещей, в зависимости от состояния переключателя ***Show Relative Coordinates***:

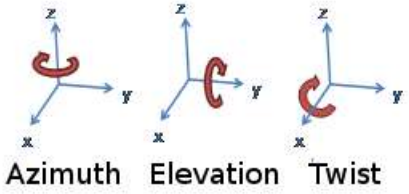
относительные координаты ***Relative Coordinates***	Опорные координаты ***Reference Coordinates***
False (Off): отключены	Система координат ***Parent-node***
True (On): включены	Размещение системы координат
(***Not shown in panel***) не показаны в панели	Система координат родительского узла ***Parent-node coordinate system***

Roll-Pitch-Yaw: Порядок поворота: ***Roll*** (крен), затем ***Pitch*** (тангаж), затем ***Yaw*** (рысканье). Следовательно, крен выполняется всегда в эталонных координат по оси X, в то время как рыскание всегда в текущих координатах вокруг Z-оси. Стрелки представляют вращение локальной системы координат относительно опорных отсчетных координат.



Крен Тангаж Рыскание

Azimuth-Elevation-Twist: Этот порядок вращения - ***Azimuth*** (Азимут), затем возвышение ***Elevation***, затем закрутка ***Twist***. Следовательно, ***Azimuth*** - это всегда относительно опорных координат относительно оси Z, а ***Twist*** всегда относительно текущих координат антенны вокруг X-оси. Стрелки показывают вращение локальной системы координат относительно координат отсчета. Обратите внимание на соответствие между этим преобразованием и способом, в котором отсчитываются углы в дальней зоне (настройки углов наблюдения за дальним полем) в узле ***Far-Field***.



Определение вращения								
Имя	***Axis***	**Направление**				**Приложенный порядок**		
	+X	+Y	+Z	право-стороннее	лево стороннее	1st	2nd	3rd
Roll (крен)	•				•	•		
Pitch(тангаж)		•			•		•	
Yaw(рысканье)			•		•			•
Azimuth			•		•	•		
Elevation		•			•		•	
Twist	•				•			•

При переключении между режимами ориентации, *Savant* преобразует три угла от одного преобразования к другому. Режим ориентации ***Orientation Mode*** можно переключить в любое время, не нарушая текущую ориентацию узла.

Orientation: Установите ориентацию узла системы координат модели ***CAD-Model***. Ориентация системы координат узла однозначно определяется тремя углами поворота. Это либо преобразование ***Roll-Pitch-Yaw*** (Крен-Тангаж-Рыскание) или ***Azimuth-Elevation-Twist*** (Азимут-Высота-Вращение), в зависимости от текущего выбора ***Orientation Mode***.

Когда включена опция ***Show Relative Coordinates***, папка в панели ***Orientation*** становится ***Relative Orientation***, а ориентация дается относительно координаты расположения, вместо координат родительского узла.

1.11 Узел параметрических моделей

Узел параметрических ***CAD-Model*** - это специализированная версия узла ***CAD***-моделей, унаследовавшая многие её свойства и характеристики.

Основное отличие состоит в том, что вместо определения модели файлом он позволяет строить параметрические формы и задать размеры и разрешения сетки (рис. 1.16). Параметрическая модель создается в виде треугольной сетки, которая обновляется в реальном времени по мере изменения этих параметров.

Примитивы, которые можно начертить в ***Savant***:

- Плоскость
- Бокс
- Двугранный отражатель
- Трехгранный отражатель
- Цилиндр
- Сплющенный цилиндр
- Конус
- Сфера
- Эллипсоид
- Плоский круг
- Парабола
- Призма
- Сплющенная призма
- Цилиндр - шляпа

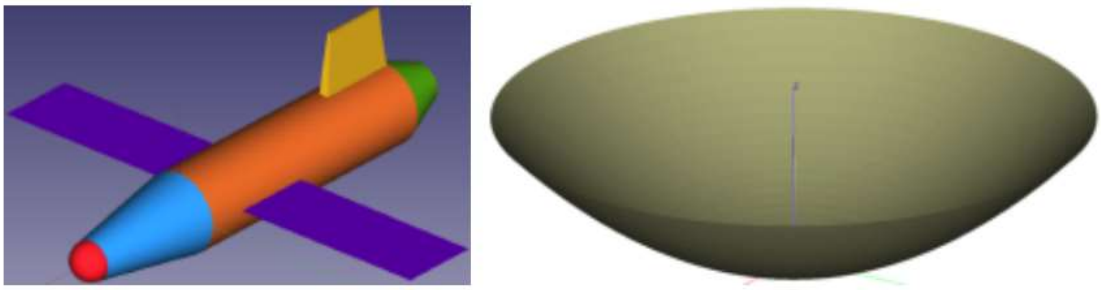


Рис. 1.16. Объекты, созданные в ***Savant*** собственными средствами

Узел ***Parametric CAD-Model*** создает разнообразные формы. Их можно совместить с другими узлами ***CAD-Model*** под узлом ***Scene***. Таким образом, они могут быть использованы для моделирования канонических форм, создания земляных плоскостей, построения простых моделей платформ, добавления деталей к сложным моделям ***CAD***, импортированных с помощью файлов и выполнения других задач САПР.

Параметрические модели ***CAD*** заданы в метрах, основной единицей длины ***Savant***. Параметрические модели ***CAD*** создаются в стандартном положении с их базой на ***XY***-плоскости. Двумя исключениями являются сфера и эллипсоид, которые создаются с центром в начале координат. Положение и ориентацию можно подгонять через свойства размещения и ориентации регулярной модели.

Ограничения: Поскольку узлы ***CAD-Model*** основаны на фасетных (с треугольной сеткой) файлах, узлы ***Parametric CAD-Model*** не могут существовать вместе с моделями ***.iges, .igs***.

1.11.1 Покрытия параметрической модели

Покрытия могут быть назначены или изменены для всей параметрической модели, введя её индекс покрытия ***Coating Index***.

Ограничение: Индексы покрытия отдельных плоскостей параметрической модели CAD изменять нельзя и попытки этого действия заблокированы. Если необходимо отредактировать различные части параметрической модели, чтобы иметь разные индексы покрытия, обходным путем является экспорт модели в фасетный файл, а затем добавление фасетного файла в проект.

1.11.2 Действия с параметрической CAD-моделью

Следующие действия возможны нажимая правой кнопкой мыши на узел ***Parametric CAD-Model*** и также на его панель свойств.

Visualize	Показать параметрическую модель в новом окне 3D просмотра
Add Wedges	Создание узла ***Wedges*** для включения дифракции на клине в моделирование
Export CAD...	Экспорт параметрической модели в другой файл в локальной системе координат (игнорируя ***Position*** и ***Orientation***)
Rename	Переименование узла параметрической модели в дереве
Duplicate	Создание и дублирование узла параметрических моделей
Delete	Удаление узла параметрической ***CAD***-модели
Save as Defaults	Сохранение текущих установок по умолчанию для узлом параметрических моделей
Restore Defaults	Восстановление установок по умолчанию для узлов ***Parametric CAD-Model***
Help	Открытие страницы этого файла

1.11.3 Выбор и размещение параметрической CAD модели

Некоторые узлы в дереве проекта изменяют свои свойства в трехмерных окнах просмотра. Параметрический узел ***CAD***-модели является одним из них, и его можно использовать для интерактивного размещения параметрических моделей ***CAD***.

Для интерактивного перемещения положения выбранного в данный момент параметрического узла ***CAD***-модели, выполните следующие действия:

1. Убедитесь, что кнопки ***Place Object, Place Object Tangent to Surface***, или ***Place Object Oriented toward Camera*** нажаты в инструментальной линейке ***3D Window Selection Toolbar***. Здесь:
   - ***Place Object*** – размещение параметрической *CAD* модели без изменения её ориентации относительно глобальной системы координат.
   - ***Place Object Tangent to Surface*** – размещение параметрической ***CAD*** модели и вращение ее так, что ее ***Z*** ось перпендикулярна к поверхности.
   - ***Place Object Oriented toward Camera*** - помещает параметрическую модель и поворачивает её таким образом, чтобы её ось z указывала на текущую видимую точку.
2. Сдвиньте курсор мыши в окно ***3D-Scene*** к поверхности ***CAD*** модели, где вы хотите расположить параметрическую ***CAD*** модель.
3. Выберите поверхность: удерживая нажатой клавишу ***Ctrl***, щелкните левой кнопкой мыши. Параметрическая ***CAD*** модель должна сдвинуться в эту точку.
4. Точнее, центр нижней грани (***zmin***) параметрического ограничивающего прямоугольника ***CAD*** модели переместится в выбранную точку. Свойство размещения ***Parametric CAD-Model*** немного отличается от других типов узлов в этом отношении, так как обычно это начало системы координат узла, которая перемещается в выбранную точку.

После того, как параметрическая ***CAD*** модель примерно помещается таким образом, её точное размещение должно быть настроено с помощью установок ***Position*** и ***Orientation*** параметрического узла. Действие размещение приведет к созданию скрытой системы координат размещения,

расположенной совместно и выровненной с обновленной системой координат параметрического узла ***CAD***-модели. Это также вызовет ***Show Relative Coordinates*** для включения. Поэтому узел координатной системы параметрической ***CAD*** модели будет отображаться и редактироваться относительно координат размещения, а не координат родительского узла. Это часто более удобно для последующей доработки.

Проблемы с интерактивным выбором и размещением: Есть несколько проблем с размещением объекта методом точки-и-щелчка (а в более общем плане, с выбором действий в ***3-D*** окне).

Savant может «запутать» в действиях выбора, если открыто более одного 3D окна просмотра. Если выбор (параметрическое размещение модели ***CAD***) не работает, попробуйте закрыть все 3D окна просмотра, а затем откройте главное окно ***3D-Scene***, дважды щелкнув узел сцены (или на главной панели инструментов) и рассматривая модель в нем.

Иногда действие выбора требуют двух или более щелчков мыши. В этом случае попробуйте увеличить масштаб более точно со стороны модели ***CAD***, где вы хотите разместить параметрическую модель ***CAD***.

1.11.3.1 Прямоугольная плоскость в плоскости XY

***Model Type = Plate*:** Параметры:

- ***Length (*m*)*** – Длина платы вдоль направления X
- ***Width (*m*)*** – ширина платы вдоль направления Y

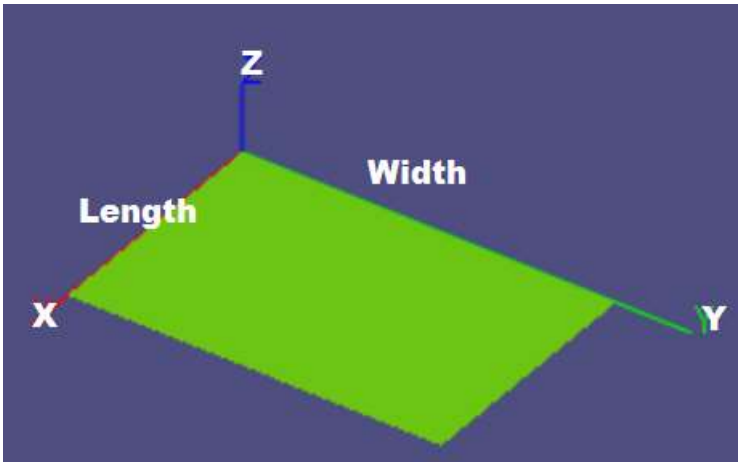


Рис. 1.17. Черчение прямоугольной платы в плоскости X0Y

1.11.3.2 Прямоугольный бокс

***Model Type = Box*.** Параметры:

- ***Length (m)*** – Длина бокса вдоль направления X
- ***Width (m)*** – Ширина бокса вдоль направления Y
- ***Height (m)*** – Высота бокса вдоль направления Z

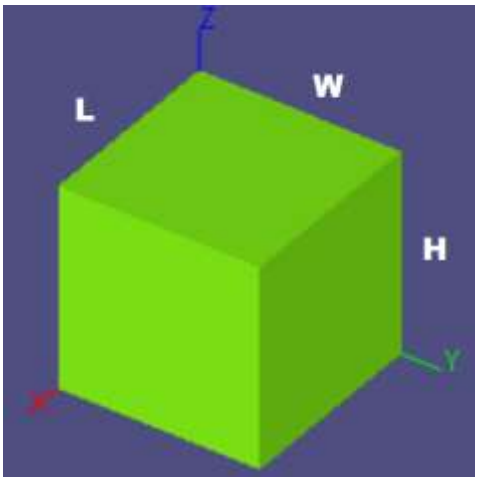


Рис. 1.18. Прямоугольный бокс

Две квадратные плоскости с заданным углом между ними ***Model Type = Dihedral.*** Параметры:

- ***Length (m)*** - Длина каждой стороны ***dihedral***
- ***Angle (deg)*** – Угол между двумя плоскими квадратами ***dihedral***

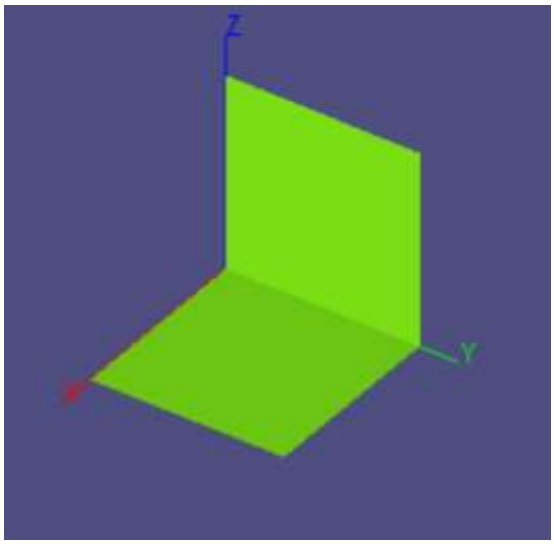


Рис. 1.19. Две плоскости под углом

1.11.3.3 Уголковый отражатель из трех квадратных плоскостей

Model Type = Trihedral. Параметры:

- ***Length (m)*** – длина каждой стороны плоскости ***trihedral*** (рис. 1.20).
-

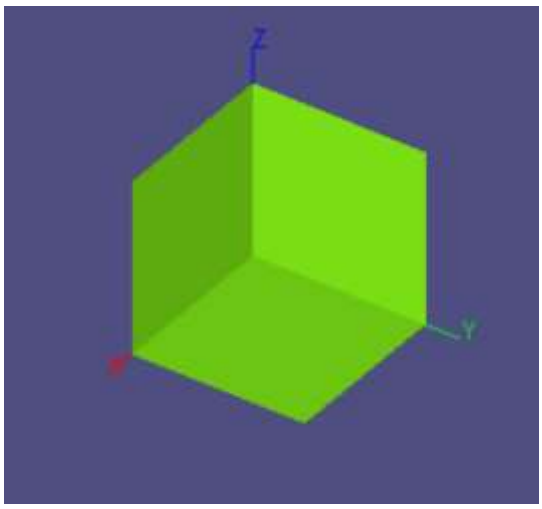


Рис. 1.20. Зеркальный отражатель в виде трех перпендикулярных плоскостей

1.11.3.4 Цилиндр

Круглый цилиндр, идущий по оси z, может быть замкнутый или разомкнутый с одного конца.

***Model Type = Cylinder*.** Параметры:

- ***Height (m)*** – Высота цилиндра вдоль направления Z
- ***Radius (m)*** – Радиус цилиндра
- ***Closed Top*** – Переключатель открытия крышки сверху
- ***Closed Bottom*** – Переключатель закрытия крышки снизу
- ***Mesh Density*** – Безразмерный параметр, который управляет плотностью сетки разбиения. Высокая величина приводит к более мелкой сетке разбиения и высокому качеству дискретизации.
- ***Mesh Option*** – Возможны две опции, ***Improved*** и ***Legacy***. ***Improved*** - эта величина по умолчанию в ***Savant*** 5.0.1, потому что это приводит к лучшему разбиению на сетку для искривленных форм, а опция ***Legacy*** слева для поддержки предыдущий версий ***Savant***. В общем, ***Improved*** дает лучшие результаты, поскольку выполняет разбиение на более мелкую сетку.

Плотность разбиения цилиндра ***Mesh Density*** иногда улучшается, когда выбраны ***Closed Top*** или ***Closed Bottom***. Это обеспечивает выравнивание вершины между сторонами цилиндра и круглыми плоскостями на концах для того, чтобы предотвратить утечки луча на швах.

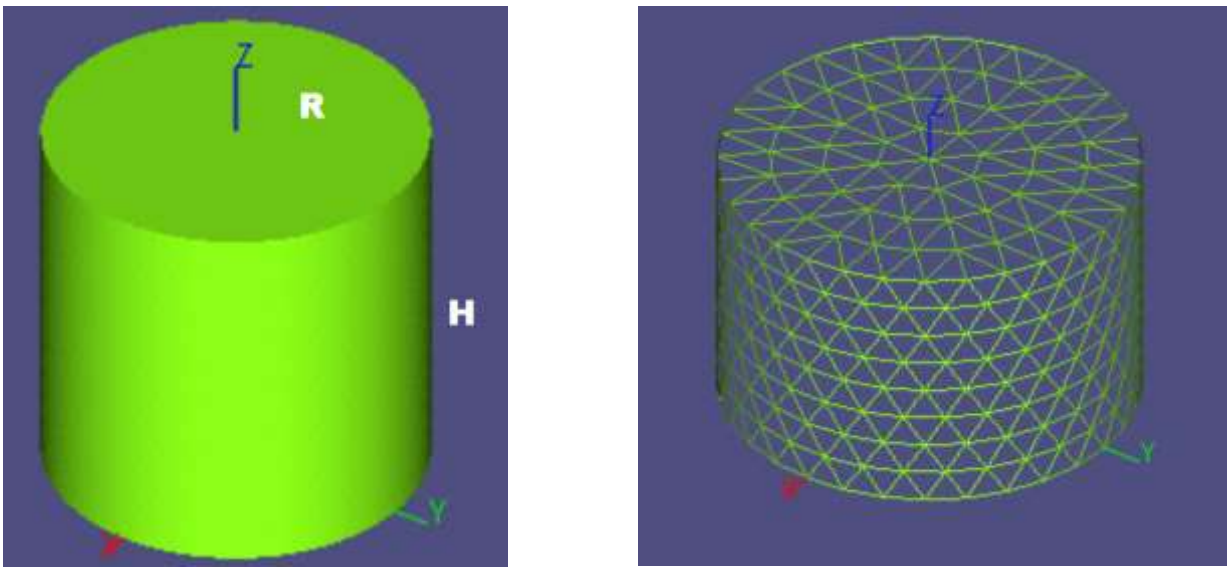


Рис. 1.21. Цилиндр и его сетка разбиения

***Model Type = Tapered Cylinder*: -** цилиндр вдоль оси Z с прогрессивным изменением радиуса, который может быть закрыт и открыт сверху и снизу

Параметры:

- ***Height (m)*** – Высота цилиндра вдоль направления Z.
- ***Radius (m)*** – Радиус базовой окружности.
- ***Top Radius (m)*** – Радиус верхнего круга.
- ***Closed Top*** – Переключатель на замыкание плоскости сверху.
- ***Closed Bottom*** – Переключатель на закрытие нижней плоскости.
- ***Mesh Density*** – Безразмерный параметр, который управляет плотностью сетки разбиения. Наивысшее значение дает более плотную сетку разбиения и высокое качество дискретизации.

Плотность сетки увеличивается в режиме ***Closed Top*** или ***Closed Bottom***. Это обеспечивает выравнивание вершины между сторонами цилиндра и круглыми плоскостями на концах для предотвращения искажений луча на швах.

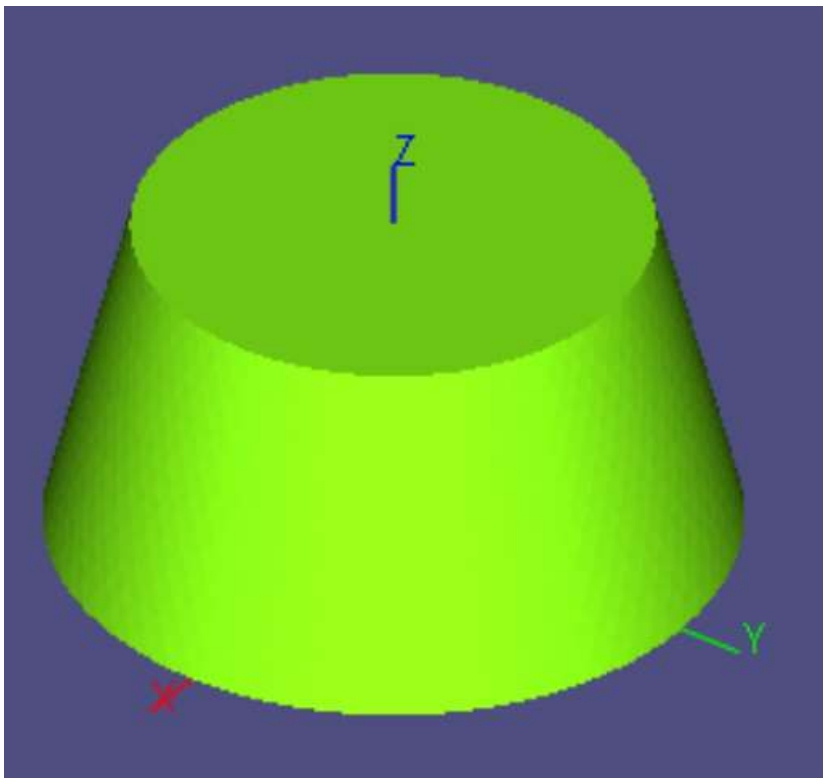


Рис. 1.22. Конический цилиндр

Model Type = Cone*: *Z-axis, круглого сечения конуса с дополнительной закрывающей пластиной.

Параметры:

- ***Height (m)*** – Высота конуса вдоль направления Z.
- ***Radius (m)*** – Радиус базы.
- ***Closed Bottom*** – переключатель замыкания нижней плоскости.

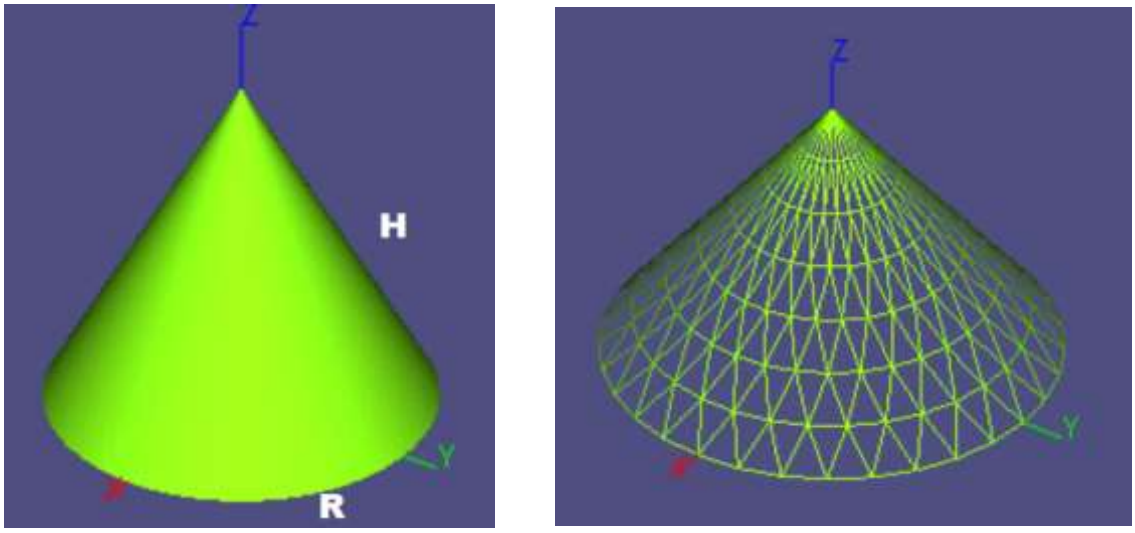


Рис. 1.23. Конус и его сетка

Сфера

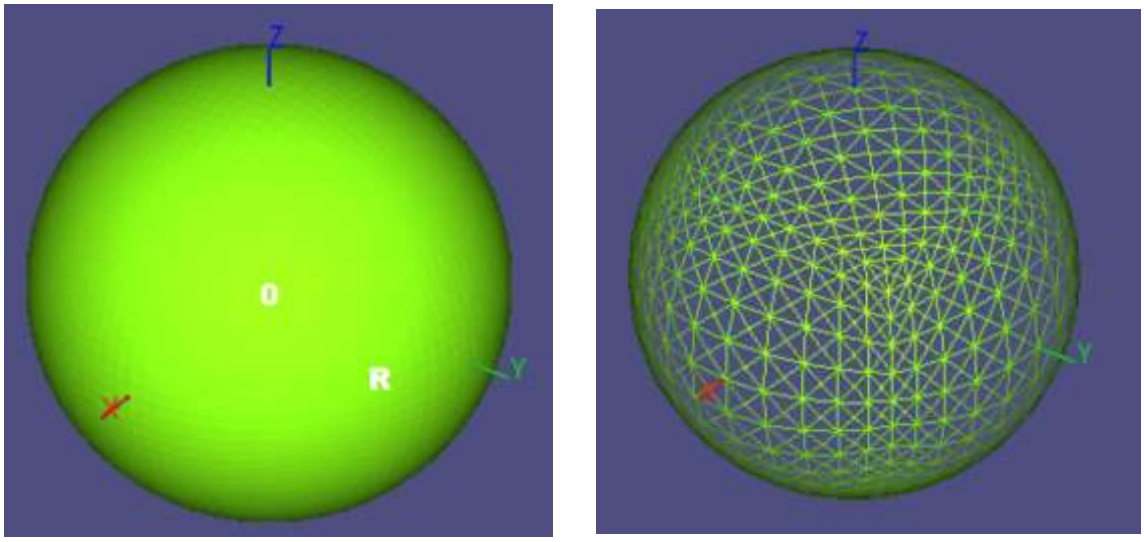


Рис. 1.24. Сфера и разбиение ее поверхности на сетку

***Model Type = Sphere*:** сфера с заданным радиусом и центров в начале координат.

Параметры:

- ***Radius (m)*** – Радиус сферы
- ***Mesh Density*** – Безразмерный параметр, который управляет плотностью сетки. Наибольшая величина дает плотную сетку разбиения, и высокое качество дискретизации.
- ***Use Symmetric Mesh*** – Переключатель между алгоритмами разбиения на сетку. Сетка использует квадраты, которые подразделяются на четыре треугольника с пятой точкой в центре при включении. В противном случае квадраты делятся по диагонали на два треугольника. Все точки лежат на поверхности сферы. Он виден только для устаревшей опции ***Legacy mesh***.

1.11.3.5 Эллипсоид

***Model Type = Ellipsoid*:** Эллипсоид (рис. 1.25) задается радиусом для каждого направления координат, с центров в начале координат .

Параметры:

- ***X Axis Ellipsoid Radius (m)*** – Радиус эллипсоида вдоль оси X.
- ***Y Axis Ellipsoid Radius (m)*** - Радиус эллипсоида вдоль оси Y.
- ***Z Axis Ellipsoid Radius (m)*** - Радиус эллипсоида вдоль оси Z.

- ***Mesh Density*** – Независимый параметр, который управляет плотностью сетки. Наивысшее значение дает более плотную сетку разбиения и высокое качество дискретизации.
- ***Use Symmetric Mesh*** - Переключение между двумя алгоритмами создания сетки. Сетка использует квадраты, которые подразделяются на четыре треугольника с пятой точкой в центре при включении. В противном случае квадраты делятся по диагонали на два треугольника. Все точки лежат на поверхности эллипсоида. Он виден только для ***Legacy*** параметра ***mesh***.

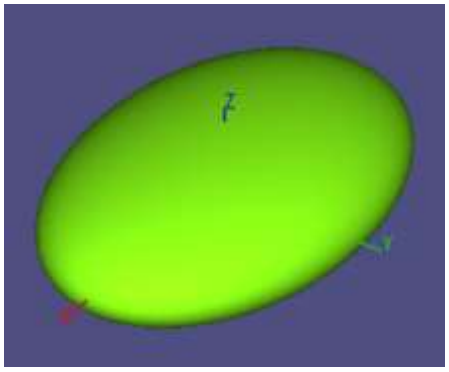
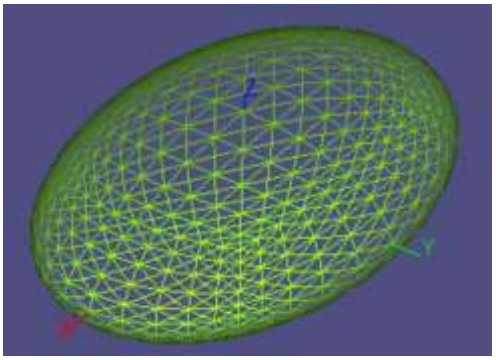



Рис. 1.25. Объемный эллипсоид

1.11.3.6 Круглая плоскость

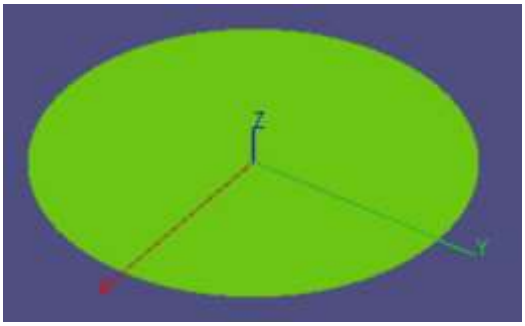
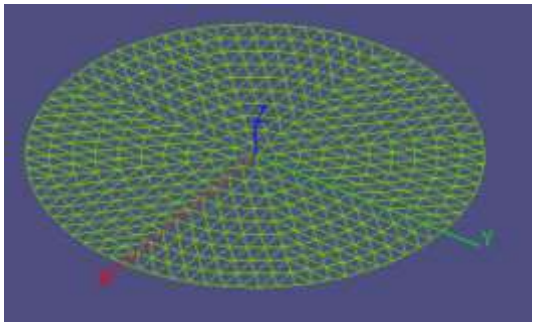



Рис. 1.26. Плоский круг

***Model Type = Circular Plate*:** Круглая плоскость в плоскости XY с параметрами:

- ***Radius (m)*** – радиус окружности.
- ***Mesh Density*** –плотность сетки. Наивысшее значение дает более плотную сетку разбиения и высокое качество разбиения. Сетка использует треугольные ячейки сетки примерно одного размера и избегает длинных, узких треугольников, излучающих из центра плоскости.

1.11.3.7 Параболоид

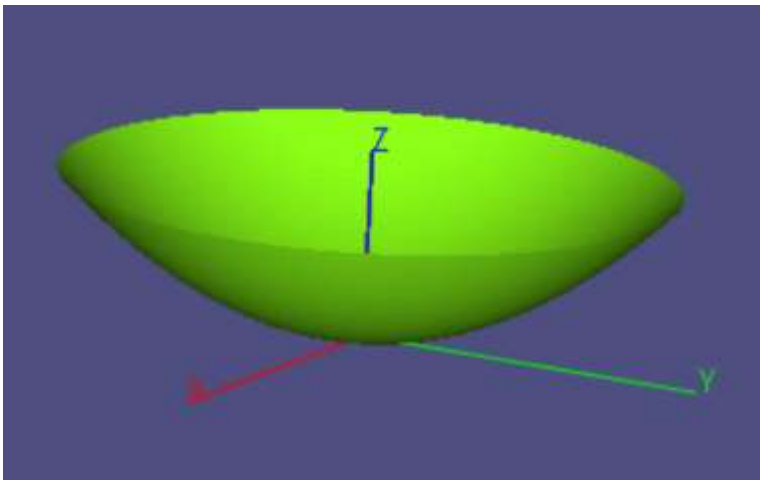


Рис. 1.27. Параболоид (параболический отражатель)

***Model Type = Parabola*:** Секция параболоида с z-осью с заданным радиусом, смещением и длиной фокусного расстояния (рис. 1.27).

Параметры:

- ***Radius (m)*** – радиус параболоида, измеренный как поперечное расстояние от оси z до внешнего обода.
- ***Focal Length (m)*** – расстояние *f*, от центра поверхности параболоида до его фокуса. Когда она пересекает плоскость ***XZ***, уравнение параболы дается в виде,

$$z = (x+offset)^2/(4f),$$

где

- ***offset*** – точка смещения вершины параболоида по оси X.

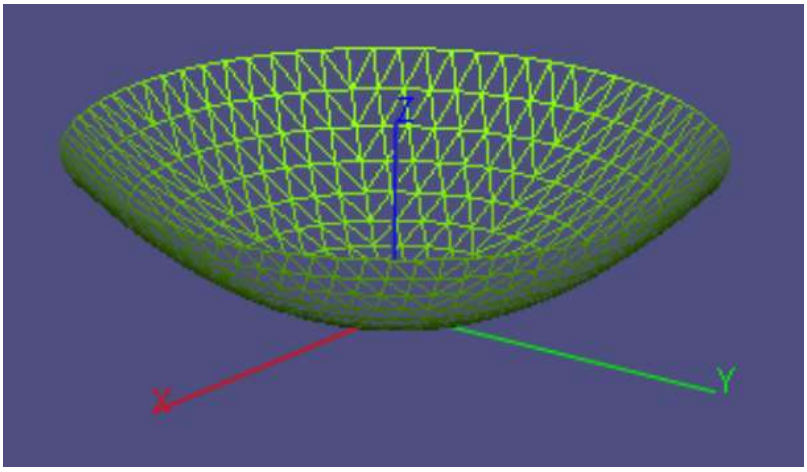


Рис. 1.28. Сетка, на которую разбивается параболоид

Сетка (рис. 1.28) создает приблизительно равные по размеру треугольники и избегает длинных, тонких треугольников около центра. Вершина параболоида расположена на плоскости ***XУ***, со смещением ***x=offset, y=0***. Центр проекции поверхности параболоида на плоскость ***XУ*** находится в начале координат системы координат.

1.11.3.8 Параллелепипед

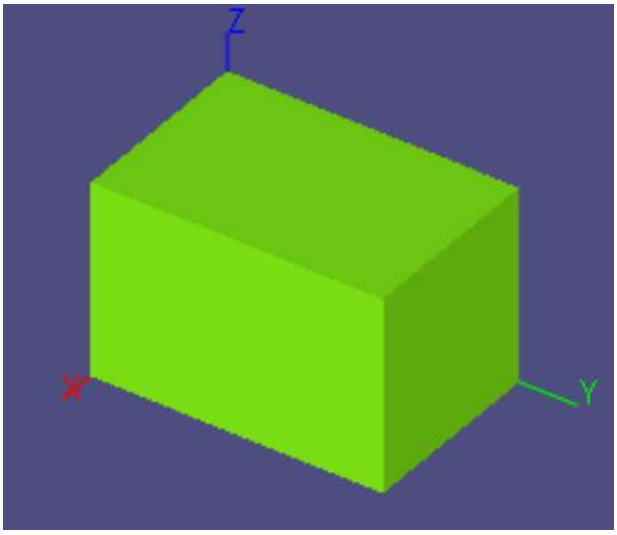


Рис. 1.29. Параллелепипед

Model Type = Prism: призма (параллелепипед, рис. 1.29) с заданным направлением и опциями для открытого или закрытого конца

Параметры:

- ***Length (m)*** – длина призмы (в направлении X).
- ***Width (m)*** – ширина призмы (в направлении Y).
- ***Height (m)*** – Высота призмы (в направлении Z). Для угловых призм с частными параметрами, ***Height*** определяет высоту до верхней части призмы, но не длину стороны.
- ***Prism Direction*** - трехмерный вектор, указывающий направление, в котором основание XY-плоскости будет вытягиваться для создания угловой призмы. Z-компонент должен быть больше нуля, X и Y-компоненты должны быть больше или равны нулю (>= 0).
- ***Number of Sides*** - число сторон основания призмы. В настоящее время это ограничено 4 сторонами и не может быть изменено.
- ***Closed Top*** - переключатель, закрыта ли призма сверху. Верхняя сторона призмы параллельна плоскости XY: **z = *Height*.**
- ***Closed Bottom*** – переключатель, закрыта ли призма снизу в плоскости ***XY***.

- Верхняя поверхность всегда центрирована вдоль ***Prism Direction***.

1.11.3.9 Призма

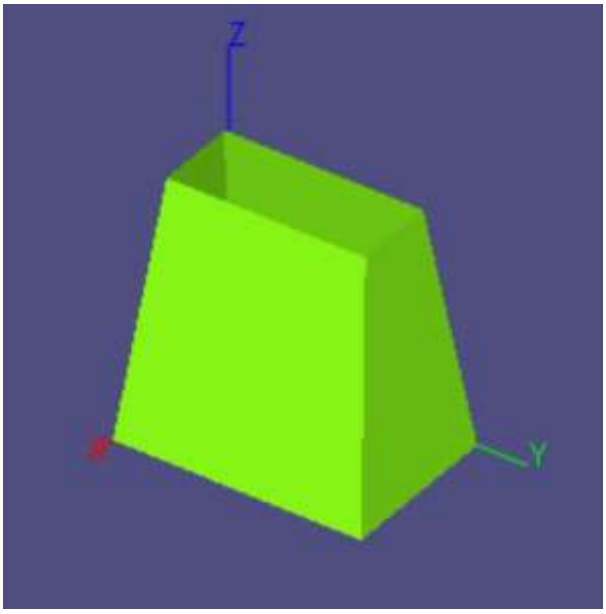


Рис.1.30. Призма

***Model Type = Tapered Prism*:** Наклонная призма с разными плоскостями сечения (рис. 1.30).

Параметры:

- ***Length (m)*** – длина призмы (X направление);
- ***Width (m)*** – ширина призмы (Y направление);
- ***Height (m)*** – высота призмы (Z направление). Для скошенной призмы, ***Height*** определяет высоту верхней части призмы, а не длину стороны.
- ***Prism Direction*** - вектор, указывающий направление, в котором основание XY-плоскости будет вытягиваться для создания угловой призмы. Z-компонента должен быть больше нуля, X и Y-компоненты должны быть больше или равны нулю (>=0).
- ***X Direction Taper (%)*** - процент конусности в X направлении от плоскости основания до верхней грани. Конусность < 100% создает более узкую сторону вверху и > 100% создает более широкую верхнюю часть. Конусность должна быть ≥ 0%.
- ***Y Direction Taper (%)*** - конусность вдоль Y размера от базы плоскости XY к верхней поверхности. Величина ***Y Direction Taper*** имеет те же ограничения и поведение, что и конус направления X.
- ***Number of Sides*** – число сторон базы призмы, в настоящее время ограничено 4-мя сторонами и не может быть изменено.

- ***Closed Top*** – переключатель, закрыта ли призма сверху. Верхняя крышка параллельная плоскости XY: ***Z=Height***.
- ***Closed Bottom*** - переключатель, имеет ли призма нижнюю закрытую базу в плоскости XY.

1.11.3.10 Форма в виде шляпы

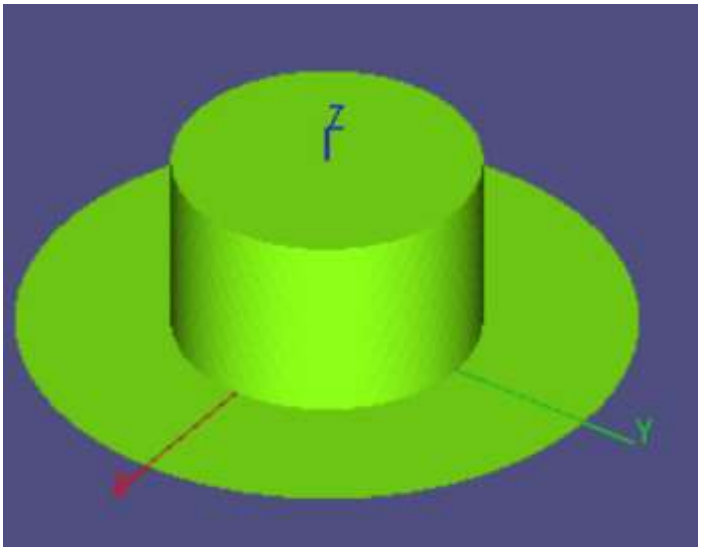


Рис. 1.31. Форма в виде «шляпы»

***Model Type = Tophat*:** круглая плоскость с круглым цилиндром сверху.

Параметры:

- ***Height (m)*** – высота цилиндра.
- ***Base Radius (m)*** – радиус базовой плоскости, обода "шляпы".
- ***Center Radius (m)*** – радиус цилиндра, сверху «шляпы».

Coating Index **(**Индекс покрытия): установка индекса покрытия для всех поверхностей параметрической модели ***CAD***.

Индекс покрытия параметрической модели ***CAD*** можно изменить в любое время. Его интерпретация точно так же, как индексы покрытия, которые связывают поверхности в импортированных файлах ***CAD***. Она используется для указания узлов покрытий поверхностей модели ***CAD***.

Например, если вы установите ***Coating Index*** ="3", то ***Savant*** создаст узел ***Coat Index*** названный ***Coat Index*** *3* под узлом ***Index Coatings***, а также узел ***PEC*** (если он еще не существует). После этого ***Coat Index*** *3* можно перетащить из-под узла ***PEC*** в любой другой узел ***Coating***. Это изменит материальные свойства параметрической модели ***CAD*** и всех других поверхностей модели ***CAD*** , с индексом покрытия ***Coating Index*** = "3".

1.12 Опции сетки для сфер и эллипсоидов

Параметр ***Use Symmetric Mesh*** предоставляет выбор стилей сетки. Нормальная сетка (левое изображение ниже) с отключенной ***Use Symmetric Mesh*** производит треугольные грани путем создания сетки аналитической криволинейной поверхности с квадратами, а затем разбивает квадраты на два треугольника. Симметричная сетка (справа внизу) создает треугольные грани, разделяя те же квадраты на четыре треугольника и добавляя центральную точку. Все вершины, включая центральную точку, лежат на поверхности искривленного примитива.

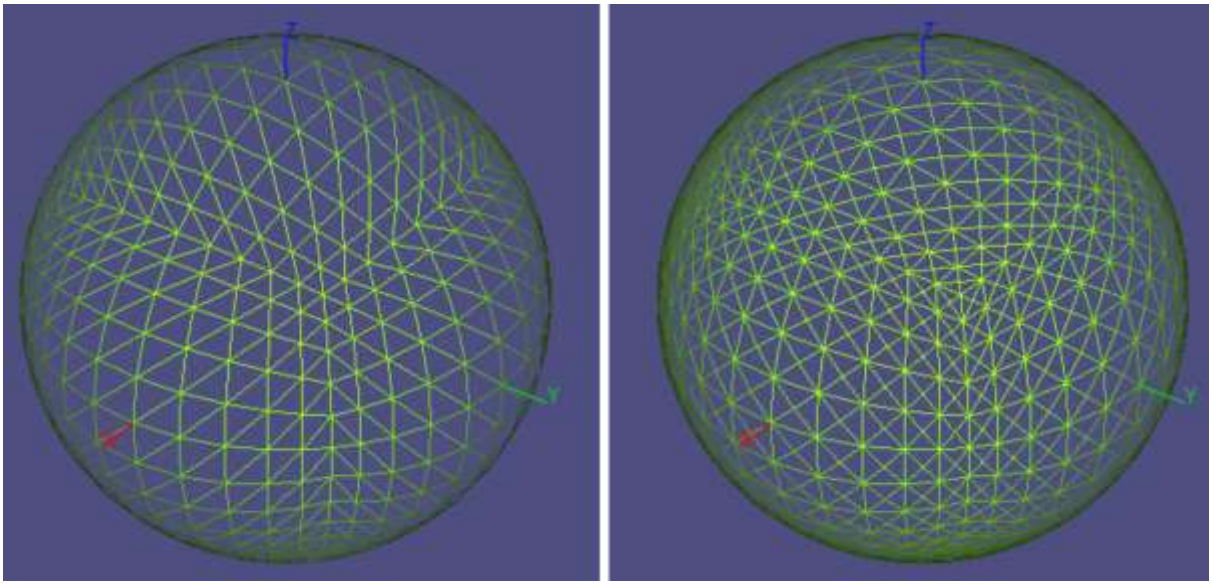


Рис. 1.32. Различные стратегии разбиения на сетку

Оба варианта сетки предлагаются в качестве альтернативы, так что лучший вариант может быть выбран для конкретного сценария. Для фиксированной плотности сетки ***Mesh Density*** симметричная сетка будет иметь больше треугольников с маленькими площадками, которые обеспечивают более точное представление базового аналитического примитива. Симметричная сетка будет иметь в 2 больше граней, каждая с 1/2 площади и с меньшим отклонением от идеальной криволинейной поверхности.

1.13 Узел покрытия

В узле ***Coating*** задается материалы покрытий, которые накладываются на поверхностим модели *CAD*. По умолчанию, *Savant* создает два простых покрытий: ***PEC*** и ***Perfect Absorber***. Дополнительные узлы покрытия могут

быть созданы под узлом ***Coatings*** для определения новых покрытий с различными электрическими свойствами.

Узлы покрытия содержатся в узле ***Coatings***. Для большинства типов покрытий узлы покрытия не имеют дочерних узлов, за исключением узлов индекса слоя. В случае покрытия, заданного как набор диэлектрических слоев, узел покрытия также служит как контейнер для узлов многослойного покрытия.

Материальные покрытия наносятся путем связывания заданной поверхности CAD с целочисленным индексом покрытия ***(integer coating index)***, а не непосредственно с узлом ***Coating***. Целочисленные индексы покрытия, представленные узлами ***Coat Index***, находятся в узле ***Coating***, и фактически определяют покрытие, присвоенное этому целочисленному индексу. Это позволяет легко изменить материальное покрытие на любую поверхность *CAD* сразу, путем перетаскивания ***Coat Index*** к другому узлу покрытия.

1.13.1 Концепция покрытия в Savant

Когда луч попадает на поверхность, генерируется отраженный луч таким образом, что угол отражения равен углу падения (закон Снеллиуса). Отраженный луч поля являются производным от падающего луча поля на поверхности покрытия, согласно принципам геометрической оптики (ГО). Для покрытия ***PEC*** отраженные поля лучей имеют ту же величину, что и поля падающих лучей (рис. 1.33). Для поверхности с идеальным поглощением, поле отраженного луча равно нулю; по этой причине отраженный луч даже не генерируется.

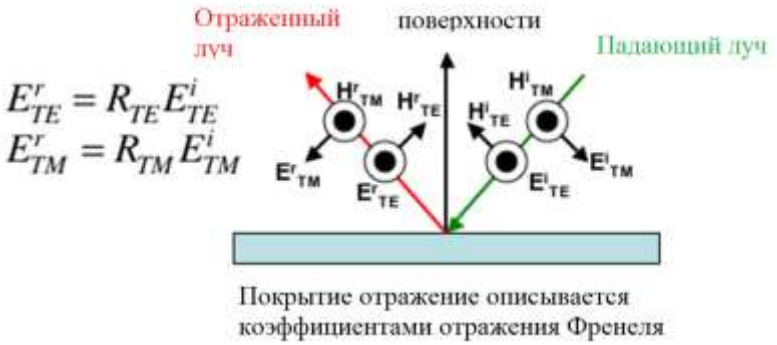


Рис. 1.33. Падающие и отраженные лучи на поверхности PEC

В общем случае покрытие определяется таблицей коэффициентов отражения Френеля как функцией угла падения луча (относительно перпендикулярной поверхности) и частоты.

Коэффициенты Френеля основаны на предположении о падении и отражении плоской волны, и они представляют собой отношение отраженного поля относительно падающего поля. Эти коэффициенты зависят от поляризации и определяются как R_{TE} и R_{TM}. Пакеты лучей создают сложные волновые границы, и каждый луч представляет собой образец того волнового фронта, который считается локально плоским. При условии, что волновой фронт не слишком неоднородный, а покрытия не толстые по сравнению с их размерами, коэффициенты Френеля, применяемые в сочетании с отдельными лучами, дают хорошее приближение отражения произвольного волнового фронта от поверхности.

Пока мы обсуждали только непроницаемые покрытия. Покрытия проницаемые (например, стекла, обтекатели, стен, козырьков и т. д.) определяются таблицей коэффициентов отражения и передачи: $\boldsymbol{R_{TE}}$, $\boldsymbol{R_{TM}}$, $\boldsymbol{T_{TE}}$, и $\boldsymbol{T_{TM}}$. Когда луч попадает на проницаемое покрытие, он генерирует как отраженный луч, так и прошедший луч. Прошедший луч простирается от точки попадания на поверхность в том же направлении, что и падающий луч, как на рис. 1.34. Отметим, что переданный луч показан как начиная с верхней части поверхности, а не с нижней. В ***Savant*** модели ***CAD*** представляют бесконечно тонкие поверхности. Влияние толщины покрытия полностью задается в коэффициентах отражения и передачи.

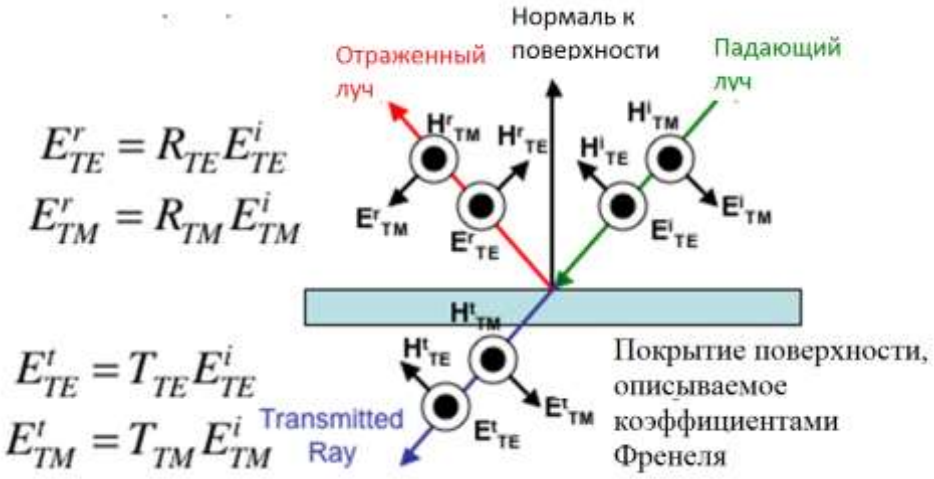


Рис. 1.34. Падающие, отраженные и проходящие лучи при падении на проницаемую поверхность

В ***Savant*** существует два способа задания комплексных коэффициентов отражения/передачи покрытия. Они могут быть либо указаны через внешнюю таблицу из файла, либо они могут быть рассчитаны автоматически

(внутренне) из параметрического описания с точки зрения состава диэлектрических слоев. Обе эти функции выполняются в узле ***Coating***.

1.13.2 Операции с покрытиями

Следующие операции выполняются нажатием правой кнопки мыши на узел ***Coating***.

Add Layer	Добавление узла ***Layer*** вниз многослойного «сэндвича»*
Material Layers Window	Открытие окна диэлектрических слоев
Add Coating	Создание нового узла ***Coating*** (отдельного от текущего)
Add Coating Index	Добавить узел ***Coat Index*** к узлу ***Coating***
Delete Unused Coat Index Nodes	Удалить неиспользуемые узлы ***Coat Index*** под этим узлом ***Coating***
Rename	Задать другое имя узлу ***Coating*** в дереве проекта
Delete	Удалить узел ***Coating***

*Это действие только возможно, когда ***Coating Type*** установлен как ***Dielectric Layers***.

1.13.3 Панель свойств покрытия

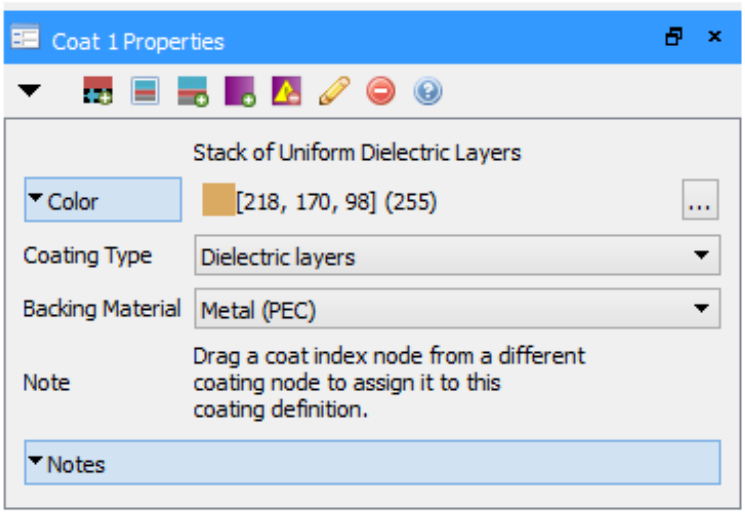


Рис. 1.35. Свойства покрытия

Color: Установка цвета для поверхности покрытия.

Поверхности ***CAD***-модели, назначенные этому покрытию через узел ***Coat Index***, будут отображаться этим цветом, если для параметра ***Color by*** в узле *CAD*-Модель установлено значение ***Coating Type***.

***Coating Type*:** тип покрытия. Эти шесть типов покрытий сведены в следующую таблицу:

Coating Type	***Backing Material***	***Penetrable***	**Описание**
Metal (PEC)	***NA***	***No***	Идеальный проводник, покрытие по умолчанию
Perfect Absorber	***NA***	***No***	Отраженные поля равны нулю, нет отраженных лучей
Single layer dielectric	***Metal (PEC)***	***No***	Диэлектрический слой сзади поверхности ***PEC***
	Half-Space	***No***	Диэлектрический слой подкрепленный сзади диэлектриком полупространства
	None	***Yes***	Диэлектрический слой без подложки
Dielectric Layers	***Metal (PEC)***	***No***	Диэлектрической слой ниже поверхности ***stack backed by PEC surface***
	Half-Space	***No***	Набор диэлектриков сзади диэлектрического полупространства
	None	***Yes***	Диэлектрическая стопка без материала сзади
Reflection Table	***NA***	***No***	Коэффициенты отражения, заданные в табличном файле
Refl/Trans Table	***NA***	***Yes***	Коэффициенты отражения/прохождения, заданные в табличном файле

Coating Type = Metal (PEC): Когда луч падает на поверхность ***PEC***, поле отраженного луча имеет ту же величину, что и поле падающего луча.

Общее поле на отражающей поверхности (падающее плюс отраженное поле лучей) имеет нулевое электрическое поле, касательное к поверхности и удвоенное падающее электрическое поле, нормальное к поверхности. Противоположная ситуация относится к магнитному полю (т. е. нет нормальной составляющей и удвоение касательных компонентов).

Coating Type = Perfect Absorber*:** при падении лучей на поверхность с идеальным поглощением, лучи поглощаются, и нет отраженных и проходящих лучей. Это не означает, что нет излучения от поверхностных токов на поверхности ***Perfect Absorber: идеальный поглотитель по-прежнему производит очень сильное рассеяние. Это рассеяние связано с падением лучей полей на поверхности. Эти лучевые поля преобразуются в эквивалентные токи на поверхности, излучаемые в углы наблюдения/точки в любом направлении (включая обратное направление); они могут быть сильными в прямом направлении. В то же время, поскольку отраженный луч имеет нулевую напряженность поля (и поэтому отраженный луч не прослеживается), эквивалентные поверхностные токи, связанные с отраженным лучом, также равны нулю, поэтому рассеяние в обратном полупространстве слабое.

***Coating Type = Single layer dielectric*:** Этот тип покрытия - один диэлектрический слой с заданными свойствами (рис. 1.36).

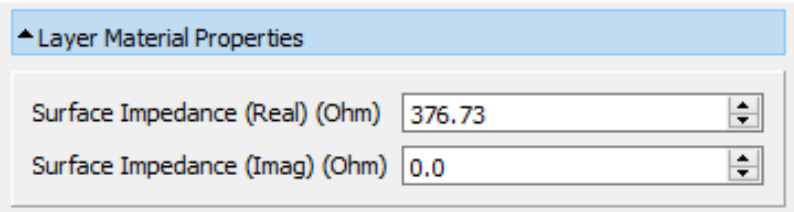


Рис. 1.36. Поверхностные характеристики материала в слое

Верхняя поверхность этого слоя соответствует поверхности модели ***CAD***, а подразумеваемая толщина покрытия складывается под поверхностью относительно падающего луча. Таким образом, когда луч падает на поверхность сверху, он падает на слой покрытия. Когда луч падает на поверхность снизу, слой покрытия остается над поверхностью с другой стороны.

Хотя это несогласованная структурная схема, она удобна с точки зрения моделирования. Последствия для пользователей заключаются в том, что необходимо подумать о том, как лучше всего поместить поверхность

покрытия в модель ***CAD***, и это зависит от того, с какой стороны поверхность будет освещаться лучами преимущественно.

Например, рассмотрим платформу с радиопрозрачным обтекателем, который должен быть смоделирован с одним диэлектрическим слоем (и без подкладочного материала). Физически область анализа имеет внутреннюю поверхность и внешнюю поверхность. Когда исследователь интересуется характеристиками излучения антенны, расположенной за радиопрозрачным обтекателем, то лучше, чтобы задать поверхность обтекателя в *CAD*-модель в соответствии с ее внутренней поверхности. С другой стороны, когда исследователь заинтересован в модели вклада поля рассеяния обтекателя, облучаемого каким-то источником вне обтекателя, то лучше, задать поверхность обтекателя в виде модели ***CAD*** по его внешней поверхности. В ситуациях, когда область, как ожидается, будет сильно освещена лучами с обеих сторон, лучший подход заключается в компромиссе путем размещения поверхности области излучения ***CAD*** поверхности на полпути между фактической внутренней и внешней поверхностями области.

Thickness (mm): Толщина слоя материала. Единицы, по умолчанию mm, изменяются в ***Preferences*** в опции ***Coating Layer Thickness***.

Use Bulk Material*:** Если эта опция не выбрана, то свойства диэлектрика задаются в папке ***Layer Material Properties. Если она выбрана, свойства материала задаются как материалы ***Bulk Material***.

Layer Material Properties*:** Задание электрических характеристик для диэлектрического материала (рис. 1.37). Эта папка панели появляется, когда не выбрана опция ***Use Bulk Material.

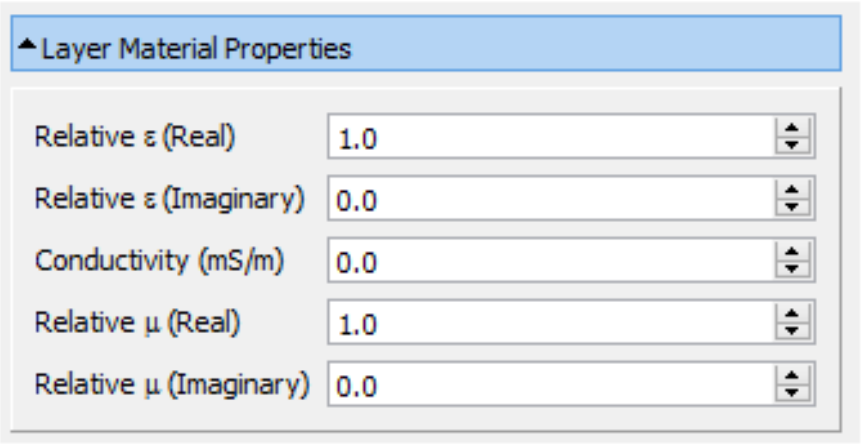


Рис. 1.37. Физические характеристики слоя материала

1.13.3.1 Панель верхнего полупространства

На рис. 1.38 приводится диалог, в который вводятся характеристики материала подложки под диэлектрическим слоем **(Backing Material),** причем**:**

- ***Metal - Metal PEC backing material***. Никакие лучи не проходят.
- ***Half-space*** – диэлектрический слой бесконечно тонкий. Никакие лучи не проходят.
- ***None*** – нет подкладки подложки. Генерируются лучи передачи.

Half-space Material Panel Folder - В этой папке панель становится видимой, когда подложка ***Backing Material*** находится в полупространстве ***Half-space*** (рис. 1.38).

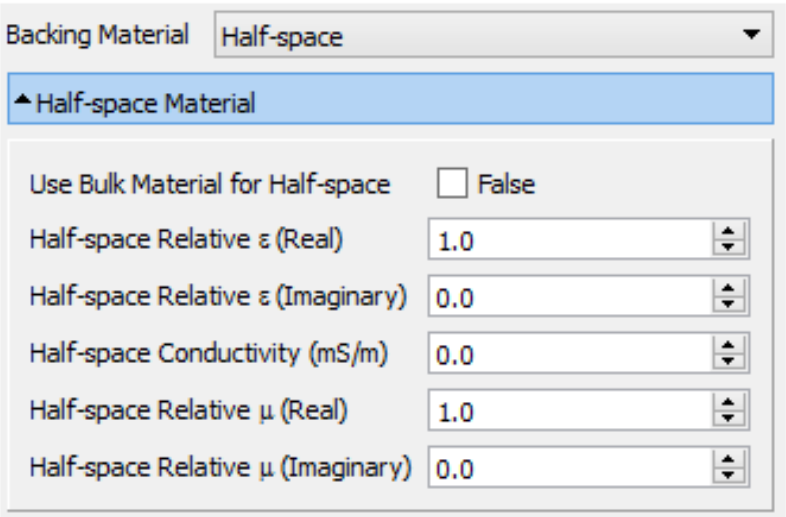


Рис. 1.38. Задание параметров материала полупространства

При отключении опции ***Use Bulk Material for Half-space*** (***false***) резервный материал полупространства настраивается непосредственно в папке панели, используя те же параметры, что и для настройки свойств узла ***Dielectric Layer***.

При включении опции ***Use Bulk Material for Half-space*** (***True***) (рис. 1.39), селектор ***Half-space Bulk Material*** становится видимым, а материал полупространства определяется на основе ***Bulk Material***. Опции, доступные в селекторе ***Half-space Bulk Material***, представляют собой имена

всех узлов ***Bulk Material***, определенных в настоящее время в проекте. Эти узлы являются узлами дерева, содержащиеся в узле ***Bulk Materials***.

Эта папка панели становится видимой, когда опция ***Backing Material*** установлена на ***Half-space***.

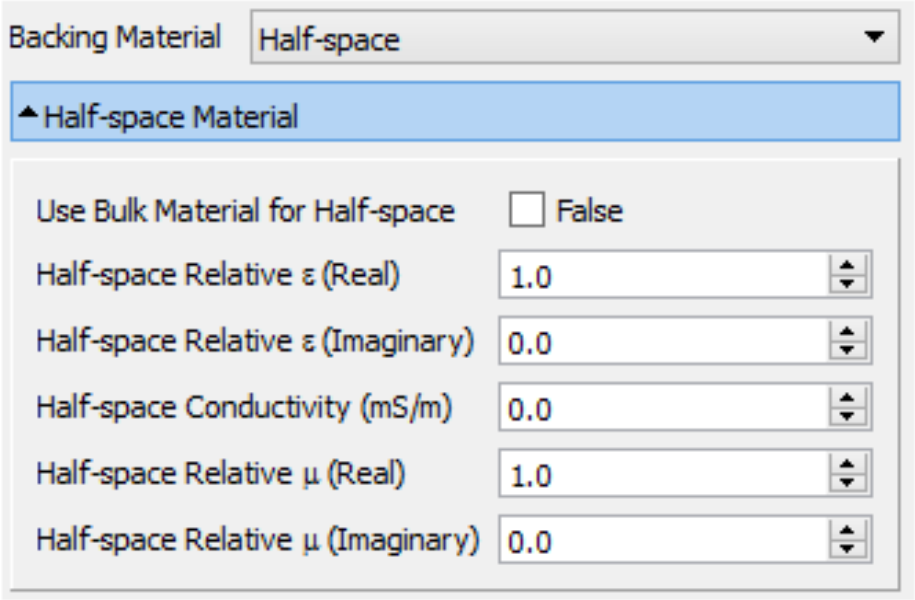


Рис. 1.39. Задание материала подложки

Coating Type = Dielectric Layers*:** покрытие представляет собой стопку однородных слоев с определяемыми пользователем свойствами. Тип покрытия по умолчанию для узла **Coating - Dielectric Layers**. Однако присвоение покрытия по умолчанию поверхности модели ***CAD, заданное с помощью узла ***Coat Index node, - Metal (PEC)***.

***Backing Material*:** материал подложки под диэлектрическим слоем. Доступны следующие опции:

- ***Metal*** – Металлическая подложка PEC. Лучи не проходят.
- ***Half-space*** – Диэлектрический слой бесконечно толстый. Никакие лучи не проходят.
- ***None*** - Отсутствие тыльной поверхности. Генерируются лучи передачи.

1.13.3.2 Папка панели материала полупространства

Эта панель становится видимой, когда ***Backing Material*** установлена как ***Half-space***.

При исключении объемного материала из полупространства (***Use Bulk Material for Half-space = False***) материал заднего полупространства

устанавливается непосредственно в папке панели с использованием тех же настроек, что и для настройки свойств материала узла ***Dielectric Layer*** .

Если параметр ***Use Bulk Material for Half-space*** включен (***True***), селектор наполовину объемного материала становится видимым, а свойства наполовину объемного материала задаются ссылкой на объемный материал. Параметры, доступные в селекторе объемных материалов полупространства - это имена всех узлов объемных материалов, которые в настоящее время задаются в проекте. Эти узлы являются узлами дерева, удерживаемыми узлом контейнера ***Bulk Materials***.

Coating Type = Reflection Table*:** Задание свойств покрытия используя файл коэффициентов отражения. Когда выбран этот тип покрытия, ***Reflection Table становится видимым. Кликните кнопку браузера, чтобы импортировать файл таблицы коэффициентов отражения.

Этот тип покрытия непроницаем. Когда луч попадает на поверхность с таким покрытием, появляется отраженный луч (взвешенный по коэффициентам в таблице), но не передается луч.

Coating Type = Refl/Trans Table*:** Определение свойств покрытия через файл коэффициентов ***reflection/transmission (рис. 1.40).

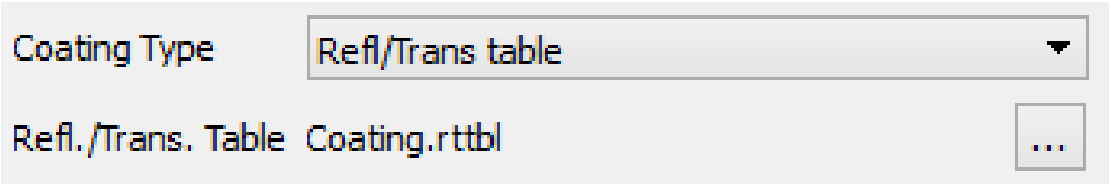


Рис. 1.40. Задание типа покрытия в файле коэффициентов отражения/передачи

1.13.4 Многослойное покрытие Окно материалов слоев покрытия

Окно ***Material Coating Layers*** обеспечивает удобный путь изменения диэлектрического покрытия. Его можно открыть, нажимая ***Material Layers Window*** в меню узла ***Coating*** или одного из узлов ***Layer nodes***. Пакет диэлектрических слоев и материалы показываются с левой стороны окна. Таблица со свойствами слоев показывается справа.

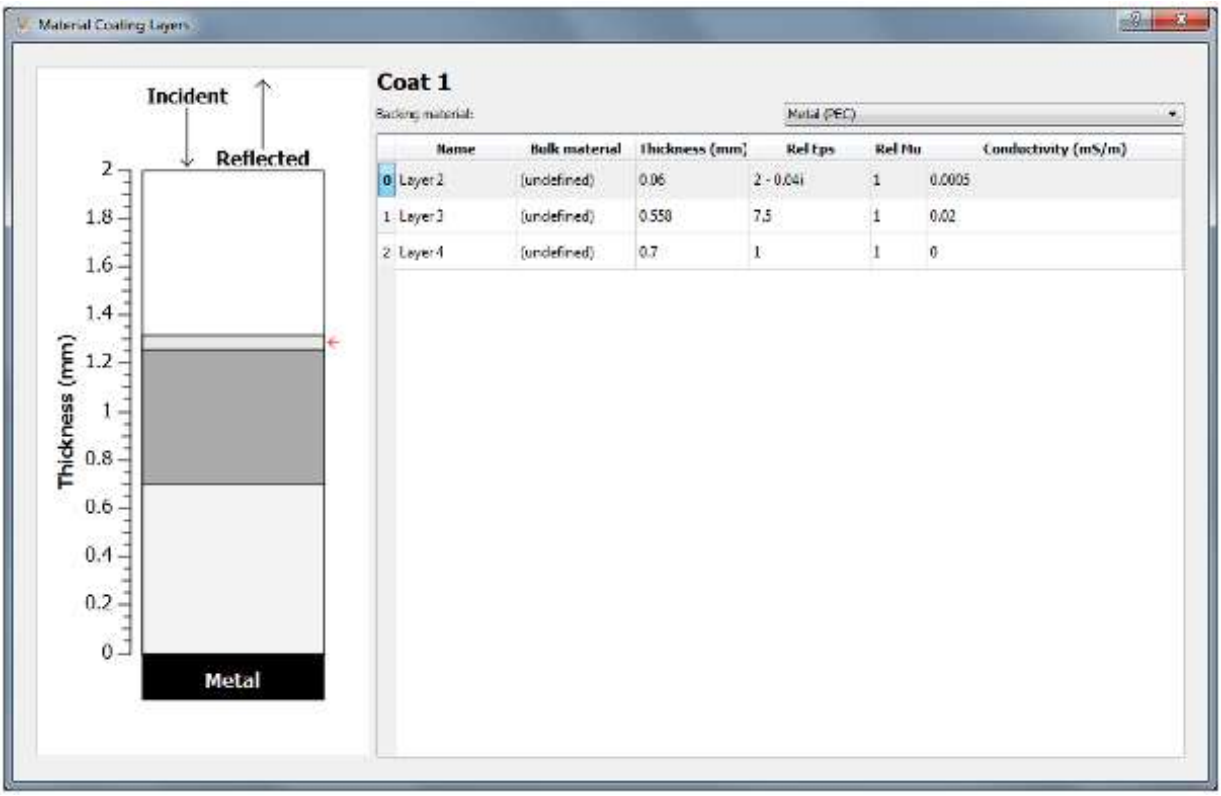


Рис. 1.41. Задание многослойного покрытия

Текущий выбранный слой обозначается красной стрелкой на графике слева и выделенной строкой в таблице. Для настройки толщины можно использовать мышь для вертикального перетаскивания горизонтальных границ между слоями. Таблица недоступна для редактирования, поэтому любые изменения свойств слоя должны выполняться с помощью панелей свойств узлов слоя. В таблице выберите строку слоя, которую вы хотите отредактировать; соответствующий узел слоя уже будет выбран в дереве проекта, и панель свойств этого слоя будет готова принять изменения.

2 ТЕОРИЯ SAVANT

Savant моделирует электромагнитное взаимодействие передающей ($\boldsymbol{T_X}$) антенны с рассеивающей структурой (например, установленной платформой) для получения следующих трех типов результатов.

- ДН рассеяния в дальней зоне
- Е-и Н-поля в определенных точках пространства
- Полученная мощность в приемной антенне $\boldsymbol{R_X}$

2.1 Метод падающих и отраженных лучей

Характеристики, рассчитываемые в *Savant* включают влияние рассеивающей геометрии. Например, если рассеивающая геометрия – это платформа антенны $\boldsymbol{T_X}$, то полученная картина дальнего поля является ДН антенны с учетом платформы. Аналогичным образом, расчет связи дает связь между двумя антеннами, установленными на платформе.

Для получения этих результатов, *Savant* требует следующие исходные данные:

- ДН дальнего поля или распределение тока свободно установленной антенны (антенн);
- 3-D поверхность модели ***CAD*** рассеивающей геометрии;
- Описание материалов покрытия.

2.2 Падающие и рассеянные поля

Концепции падающего поля, рассеивающего поля и общего поля являются ключевыми для понимания работы *Savant*.

- ***Incident Field*** - поле, излученное антенной ***Tx*** в свободное пространство (как будто рассеивающая геометрия отсутствует)
- ***Scattered Field*** – поле, излученное рассеивающей геометрии как реакция на падающее поле;
- ***Total Field*** – поле, сгенерированное ***Tx*** антенной падающее на геометрию в присутствие рассеивающей геометрии (когерентная сумма падающих и рассеивающихся полей).

Основная задача работы ***Savant*** - это, как правило, определение общего поля. Основная работа ***Savant*** - определение рассеянного поля. Рассеяние

поля производится излучением поверхностных токов, возникающих в геометрии под действием падающего поля. Чтобы получить общее поле, *Savant* также должен определить падающее поле, но это относительно простой расчет, который следует непосредственно из входной характеристики антенны T_X по схеме излучения или распределения тока. Записанные выходные данные из ***Savant*** - поле падающего и рассеянного полей. Общее поле не регистрируется (если пользователь не запросил его специально), так как оно легко восстанавливается путем сложения падающего и рассеянного поля. Например, графический интерфейс ***Savant*** это представить общее-поле результатов. С точки зрения теории, основная работа ***Savant*** заключается в нахождения поля рассеяния.

2.3 Фазовое соотношение лучей

Все входные и выходные сигналы в ***Savant*** являются временными гармоническими колебаниями (одночастотными) и представлены комплексными векторами. В интерпретации комплексных векторов, *Savant* использует множитель $\boldsymbol{e^{+j\omega t}}$ – гармонически изменяющийся от $\boldsymbol{j\omega t}$. Модули комплексных векторов даются в среднеквадратических (***RMS root-mean-square***)) (а не амплитудных) величинах. Это означает, что, например, усредненный по времени вектор Пойнтинга в заданной точке пространства задается

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}) = \mathrm{Re}\{\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}^*(\mathbf{r})\},$$

где **E(r)** и **H*(r)** - среднеквадратические значения от векторного поля на расстоянии r. Преобразование между ***RMS*** и амплитудой проста: максимальная амплитуда комплексного числа больше в √2 раз его среднеквадратичной амплитуды.

2.4 SBR в определенных ограничениях

Реализация ***SBR*** в программе ***Savant*** - это высокочастотные (асимптотические) аппроксимации на основе трассировки лучей в геометрии рассеяния. Эти методы работают на реально сложных электрически больших объектах.

Метод ***SBR*** может считаться гибридизацией метода геометрической оптики (ГО) и физической оптики (ФО). Геометрически построенные лучи идут от антенны T_X к рассеивающей геометрии, таким образом, определяя,

какие поверхности непосредственно освещены. Запущенные лучи ГО, возбужденные антенной, представляют собой расходящиеся объемно-лучевые трубки, эйканалы, которые "окрашивают" токи на поверхности платформы в соответствии с граничными условиями ГО. Эти токи излучают поля в дальнюю зону, а также формируют ближнее поле в точках наблюдения, или воздействуют на антенну $\boldsymbol{R_X}$ для создания вклада поля рассеяния. Далее из точек, в которых лучи надаются на поверхности, формируется набор отраженных лучей.

Их векторные поля обновляются в соответствии с ГО и свойствами материала отражающей поверхности. Некоторые из отраженных лучей распространяются в пространство, а остальные падают на другие поверхности в ***CAD***-модели, формируя токи вторичной эмиссии. Процесс продолжается, и таким образом, метод ***SBR*** моделирует рассеяние. Если лучи достигают проникающие поверхности, то в дополнение к отражающим лучам генерируются проходящие лучи.

Таким образом, метод ***SBR*** использует ГО для эффективного расширения традиционных методов ФО, который применим только к одному отражению от выпуклой формы, несколько отражений и произвольных фигур.

2.5 Физическая и геометрическая теории дифракции

Метод ***SBR*** - это электромагнитный (ЭМ) метод трассировки лучей. Существует две фундаментальные основы для асимптотической трассировки лучей: геометрическая теория дифракции (ГТД) и физическая теория дифракции (ФТД). При расчете ЭМ волн, трассирование лучей чаще всего ассоциируется с ГТД.

Метод ***SBR*** является частью структуры ФТД, хотя его гибридный характер (посредством использования ГО) означает, что он разделяет некоторые аспекты с ГТД. Поскольку метод ГТД более широко известен, мы стремимся здесь описать и противопоставить эти два метода расчета, а также предоставить причины в реализации ФТД в ***Savant***. Кроме того, понимание разницы между этими двумя подходами устраняет частое недоразумение относительно роли лучей в программе ***Savant*** и других программах, использующих ***SBR*** и интерпретацию их значения для конечного результата, недоразумение, возникающее из гибридной структуры ФТД/ГТД ***SBR***.

В ГТД задачи решаются путем создания геометрии рассеяния в виде объединения фигур (т. е. примитивов), характеристики рассеяния которых можно описать аналитически. Применение ГТД состоит в нахождении

нескольких критических путей от передатчика к приемнику (или наблюдателя в дальней зоне), что локально уменьшить длину пути, когда они пересекаются или движутся вдоль поверхности формы примитивов, составляющих геометрию. Типы путей включают прямую линию видимости (если она не блокируется), спектральное отражение, дифракцию на кромках (вдоль конуса Келлера), дифракцию по криволинейной поверхности (вдоль геодезической поверхности) и их комбинации. Как только эти пути найдены, их можно использовать как геометрию, для которых имеются формулы рассеяния полей. Комплексное решение находится путем суммирования вклада каждого пути. В методе ГТД на сложной геометрии рассеяния, основная часть расчетов состоит в определении критического пути. Это не тривиальная проблема, так как каждый путь ограничен двумя точками, антенной T_X и точкой наблюдения, и сложность вычисления быстро увеличивается с увеличением комбинаций путей.

Подход ФТД другой. По сути, ФТД вычисляет рассеяние, аппроксимируя электрические и магнитные токи на поверхностях платформы и излучая их в свободное пространство. В реализации ***SBR*** поверхностные токи аппроксимируются путем запуска лучей с большой плотностью от передатчика, каждый луч с амплитудой, пропорциональной ДН антенны. Затем лучи свободно проходят по объему в соответствии с принципами ГО. Лучи, попадающие на платформу, отражаются в зеркальном направлении, а затем либо удаляются, либо продолжают попадать в другие части геометрии. Когда луч попадает на поверхность, поверхностные токи аппроксимируются от полей трубки луча ГО в соответствии с граничным состоянием ГО (т. е. приближением ФО).

Ключевым моментом по отношению к ГТД является то, что условия нагрузки лучей (исключающие дальнейшее распространение) не используются для определения доминирующего направления рассеянных полей. Скорее, эти эффекты возникают из-за помех волн, излучаемых поверхностными токами. Это соответствует физическим законам, где нет таких явлений, как лучи. Это поясняет термин "физическая" в ФТД. Кроме того, лучи прослеживаются в "свободной форме" без учета их терминального состояния; ни один из лучей не ограничивается прекращением в определенной точке или побегом в определенном направлении. Они не только вынуждены излучаться от антенны $\boldsymbol{T_X}$ и взаимодействовать с геометрией, которую они пересекают в местах, которые нужно учитывать.

Это значительно упрощает алгоритм трассировки лучей и связанные с ним усилия по отношению к подходу ГТД. Сложные платформы, с

использованием многих тысяч поверхностных пластин (например, граней и ***NURBS***), легко обрабатываются без необходимости поиска горстки основных путей рассеяния, которые локально минимизируют длину пути от передатчика до приемника. Кроме того, для многократного поля наблюдения точек/углов, установка простого луча обеспечивает всю основу для решения. В методе ГТД, различные наборы критического пути луча находятся для каждой точки наблюдения.

Важное различие между ГТД и ФТД в роли лучей и правильной интерпретации их значения. В ГТД несколько критических (с минимизированной длиной пути) лучей, заканчивающихся именно на приемнике (или точно в стороне дальнего угла наблюдения) определяют поле. В ФТД много лучей вырываются во все направления, и формируют поля в точке, или по углу пропорциональные величине тока на поверхности, которые они оставили при их движении от T_X антенны, и ни один луч не является принципиально важным. В ГТД каждый из нескольких критических лучей является ценным для генерации. В ФТД, не каждый луч является ценным для генерации, но гораздо больше их должно быть получено и обработано.

Разработчики ***Savant*** выбрали метод ***SBR***, поскольку высокоточные модели ***CAD*** состоят из тысяч граней искривленной поверхности. Принципиальным ограничением подхода ГТД к трассировке лучей с точки зрения реализации является сложность разработки алгоритмов, которые надежно и эффективно находят несколько критических путей на таких моделях ***CAD***. Используя ***SBR*** и трассировку лучей "свободной формы" эта задача относительно проста. Кроме того, несложно добавить в методе ***SBR*** несколько отражений. В худшем случае, затраты растут линейно с числом отражений и, как правило, медленнее. В рамках ГТД ограничение критического пути накладывает стремительно возрастающие затраты с каждым шагом ограничения отказов.

Кроме того, плохая сетка разбиения геометрии не представляют особой проблемы. В ***SBR***, единственное требование к поверхности в *CAD*-модели заключается в том, что они представляют правильную форму для целей проверки на пересечение лучей и что они не оставляют никаких нежелательных зазоров между ними. В отличие от полно-волновых методов, нет необходимости в "хорошей" сетке, поддерживающей хорошее соотношение сторон в элементах сетки и топологически замкнутой (в отличие от просто геометрически замкнутой).

Это значительно облегчает подготовку подходящей входной модели ***CAD*** для ***Savant***, будь то новая поверхностная сетка или производная от

существующей модели ***CAD***, построенной для какой-то другой цели. Руководящая философия ***SBR*** заключается в развертывании относительно простого алгоритма трассировки лучей, который использует мощь компьютера при расчете сложной геометрии, чтобы облегчить пользователю обширную подготовительную работу ***CAD*** модели.

Хотя ***SBR*** подготовлена в рамках ФТД, по сути, она является гибридизацией ГО и ФО и поэтому обладает некоторыми аспектами ГТД. В следующей таблице приводится классификация нескольких связанных свойств ***SBR***, реализованных в ***Savant***, как относящихся к той или иной структуре.

SBR в Savant: ФТД или ГТД?

Свойство	ГТД	ФТД
На основе нахождения поверхностных токов по геометрии рассеяния		✔
Использование ГО для нахождения токов на поверхности	✓	
Не зависит от нахождения нескольких критических лучевых путей, которые минимизируют длину пути к точкам/углам наблюдения		✓
Запускает и отслеживает много лучей, чтобы исследовать сложную геометрию независимо от их замыкания		✓
Блокировка, зеркальное отражение и дифракция являются одним целым эффектом, обусловленным интерференцией рассеянного поля (излучаемых поверхностных токов) и падающее поле		✓

2.6 Алгоритм SBR

Алгоритм ***SBR***, реализованный в ***Savant***, можно изложить в следующих шагах:

1) Запуск множества лучей от антенны $\boldsymbol{T_X}$ к рассеивающей геометрии. Остальные шаги относятся к каждому лучу.
2) Назначение каждому лучу веса векторного поля в соответствии со структурой антенны $\boldsymbol{T_X}$.
3)
   (a) Если луч уходит в пространство, игнорировать его.

(b) Если луч падает на поверхность, генерируется отраженный луч. Вычислите свои поля согласно полю падающего луча, материальных свойств поверхности, и принципам ГО.

(c) Если луч попадает на проницаемую поверхность, также генерируется прошедший луч в том же направлении, что и падающий луч, а затем искривляется и обрабатывается, как отраженный луч.

4) В точке, в которую попал луч, вычисляется падающее и отраженное поле на поверхности. Они используются как аппроксимация ФО для определения эквивалентных токов на поверхности.

5) Излучение поля под углом из точки наблюдения.

a) Если в точке наблюдения находится приемная антенна $\boldsymbol{R_X}$, рассчитывается связь излучаемого поля в точке приемнике, с учетом ДН антенны приемника Rx или распределения тока.

b) Продолжить трассировку отраженного луча, сгенерированного на шаге 3b, и повторить его. Аналогично для любого прошедшего луча, генерируемого на шаге 3c. Продолжайте до тех пор, пока луч не выйдет из области анализа (шаг 3a) или не будет достигнуто максимальное количество отражений.

Шаг 5 реализуется с помощью следующего уравнения:

$$\overline{E}_S(\overline{r}) = \frac{1}{4\pi}\int_{S'} dS' \left[\left(\hat{n}' \bullet \overline{E}\right)\nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} + \left(\hat{n}' \times \overline{E}\right) \times \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} - j\omega\mu\left(\hat{n}' \times \overline{H}\right)\frac{e^{-jkR}}{R}\right] \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{E_s}$ - рассеянное электрическое поле в точке наблюдения, **S'** - область проникновения лучевый трубок в точке падения на поверхности, $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ - это совокупность электрического и магнитного полей на поверхности при рассмотрении падающего и отраженного луча, $\boldsymbol{r'}$ - положение вектора на источнике, $\boldsymbol{\check{r}}$ - единичный вектор из положения источника к наблюдателю, $\boldsymbol{n}$ - нормаль к поверхности, $\boldsymbol{R}$ - положение вектора для наблюдателя, $\boldsymbol{R}$ - расстояние от источника до наблюдателя, а $\boldsymbol{\mu_0}$ - магнитная проницаемость в свободном пространстве. Эквивалентные токи и заряды, указанные в пункте 5 получены при взаимном пересечении или скалярного произведения $\boldsymbol{\check{r}}$ с $\boldsymbol{E}$ или $\boldsymbol{H}$, как указано в (1).

Выражение (1) может использоваться для вычисления вклада рассеянного поля в любой точке наблюдения. Для углов наблюдения в дальнем поле, множитель ***exp(-jkR)/R*** в ур. (1) заменяется фазовым коэффициентом, соответствующим выбранной опорной точке фазы, что дает результат в единицах [В] вместо [В/м].

Если в структуре анализа имеется приемная антенна Rx, то комплексная амплитуда приемного сигнала равна

$$b = \frac{-j\lambda}{\sqrt{4\pi\eta_0}} \overline{E} \bullet \overline{d}_{Rx} \qquad (2)$$

где $d_{\boldsymbol{Rx}}$ -вектор направленности дальнего поля в масштабе поля антенны Rx, что будет более полно рассматриваться в следующем разделе по моделированию источника. $\boldsymbol{E}$ - это падающее или рассеянное электрическое поле в точке антенны $\boldsymbol{R_X}$, а $\boldsymbol{\eta_0}$ - это импеданс свободного пространства. Величина b – это комплексная амплитуда принимаемого сигнала, подаваемого в линию передачи, которая имеет импеданс, согласованный с $\boldsymbol{R_X}$ антенны. Принятая мощность задается параметром $|\boldsymbol{b}|^2$, но ***Savant*** записывает результаты как b для сохранения информации о фазе.

Для антенны $\boldsymbol{R_x}$, описанной источниками тока, уравнение (2) приводится к более точному уравнению, где рассеянные электрические и магнитные поля умножены на векторы амплитуды источников тока антенны $\boldsymbol{R_x}$ через векторное произведение. То есть рассеянное поле вычисляется отдельно на каждом "источнике" тока антенны $\boldsymbol{R_x}$, а векторные точечные продукты затем когерентно суммируются. Хотя источники тока представляют антенну $\boldsymbol{R_x}$ в качестве поглотителя, они служат также для характеристики антенны $\boldsymbol{R_x}$ в качестве приемника в соответствии с теоремой взаимности, и этот факт используется для определения $\boldsymbol{b}$ для антенны $\boldsymbol{R_x}$, характеризующейся таким образом.

2.7 Моделирование источника лучей (антенна Tx)

На втором шаге алгоритма ***SBR***, каждому лучу, запущенному с антенны $\boldsymbol{T_X}$, присваивается вес векторного поля в соответствии с ДН поляризованной антенны $\boldsymbol{T_X}$. В ***Savant*** автономные антенны не характеризуются как физические геометрические структуры и материалы. Вместо этого они характеризуются своими свойствами излучения в свободном пространстве. Это связано с асимптотическим (высокочастотным) характером ***SBR***, который не подходит для непосредственного моделирования антенны на основе ее физического описания.

Savant реализует две альтернативные концепции для описания свойств излучения свободностоящих ***Tx*** (и $\boldsymbol{R_X}$) антенн:

- файл ***patdat*** (или формула для встроенной параметрической антенны)
- файл **.csrc** (или формула, если встроенные параметрические антенны, которые поддерживает это представление)

Они могут быть либо подготовлены в виде внешних входных файлов в ***Savant***, либо сгенерированы из одной из встроенных параметрических антенн

Savant. В случае источников тока, они также могут быть внутренне сгенерированы на основе захвата ближнего поля, импортированного из другой программы в виде узла ***Near Field Antenna*** (например, с помощью ***HFSS-Savant Datalink***).

Рассмотрим сначала антенну, описанную в виде ДН дальнего поля. Падающее электрическое поле, генерируемое такой антенной, задается формулой

$$\overline{E}_i = \sqrt{\frac{P\eta_0}{4\pi}}\left[d_\theta\hat{\theta} + d_\phi\hat{\phi}\right]\frac{e^{-jkR}}{R} \tag{3}$$

где $\boldsymbol{d_\theta}$, $\boldsymbol{d_\varphi}$ - коэффициенты масштабирования поля в $\breve{\boldsymbol{\theta}}$ и $\breve{\emptyset}$ - направлениях, которые являются взаимно ортогональными в направлении излучения $\breve{\boldsymbol{r}}$, $\boldsymbol{P}$ - общая мощность излучения, $\boldsymbol{k}$ – волновое число свободного пространства, $\boldsymbol{R}$ - расстояние от антенны до наблюдателя. Числа $\boldsymbol{d_\theta}$, $\boldsymbol{d_\varphi}$ являются комплексными числами (имеют модуль и фазу) и зависят от угла наблюдения.

Их квадраты величин – направленности по мощности $\boldsymbol{D_\theta}$, $\boldsymbol{D_\varphi}$, которые являются более привычными показателями антенны, а поскольку они не могут использовать фазовые характеристики дальнего поля, ***Savant*** работает, вместо этого, с помощью менее знакомым масштабированием по полю. Этот масштаб есть падающее электрическое поле $\boldsymbol{E_i}$ в (3), которое пропорционально запущенным лучам согласно картине дальнего поля антенны $\boldsymbol{T_X}$.

Вышеприведенное выражение справедливо только для значений $\boldsymbol{R}$ достаточно больших, чтобы находиться в дальнем поле антенны: $\boldsymbol{R} > \boldsymbol{R_{ff}}$. Поскольку переход от ближнего поля к дальнему полю происходит постепенно, нет фиксированного определения $\boldsymbol{R_{ff}}$. Теоретически R_{ff} приближается к бесконечности. С практической точки зрения для точных расчетов, можно использовать $\boldsymbol{R_{ff} = max(2\lambda,\ 2D^2/\lambda)}$, где $\boldsymbol{D}$-наибольший линейный физический размер антенны.

Для антенн, расположенных в непосредственной близости от значительно рассеиваемой геометрии, так что эта геометрия находится на расстоянии $\boldsymbol{R} < \boldsymbol{R_{FF}}$, Savant требует точного представления антенны $\boldsymbol{T_X}$ (и $\boldsymbol{Rx}$ антенны для сценариев связи) как в ближней, так и дальней области. Этой цели служит характеристика отдельно стоящей антенны с точки зрения источников тока, где каждый источник тока представляет собой короткий электрический или магнитный диполь с положением, ориентацией и весом (моментом). В ***Savant*** весовые коэффициенты (возбуждения) могут быть

частотно-зависимыми.

Существуют точные формулы для поля, создаваемых электрически короткими диполями (диполями Герца), которые работают на всех дистанциях. К ним относятся члены, пропорциональные $1/R^2$ и $1/R^3$, которые доминируют в области ближнего поля, но быстро уменьшаются, становясь незначительными в области дальнего поля. Следовательно, источники тока представляют антенну всегда более точно и более широко, чем используемая ДН дальнего поля.

В ***Savant*** лучевые пучки запускаются и обрабатываются отдельно от каждого короткого сегмента источника T_X антенны, характеризующейся источниками тока. Кроме того, лучевое поле, созданное на шаге 2 алгоритма ***SBR***, включает в себя члены более высокого порядка $1/R^2$ и $1/R^3$, так как это необходимо для точного расчета рассеяния с поверхностей антенны. Результаты, обусловленные каждым источником тока, затем объединяются когерентно.

2.8 Нормализация и масштабирование мощности

Если пользователь не выполнил нормализацию мощности, ***Savant*** перенормализирует мощность передающей антенны T_X так, чтобы выходные результаты дальнего поля масштабировались по усилению (или направленности), в то время как выходные результаты ближнего поля получаются так, что антенна T_X излучает 1 Вт.

Для сценария связи двух антенн, и чувствительность антенны R_X нормируется так, что результаты Rx получается относительно излучения T_X антенны в 1 Вт. Для результатов дальнего поля, вопрос частотной характеристики усиления антенны зависит от потерь поверхности покрытия.

В ***Savant*** 18.0, по умолчанию нормализация мощности - это ускоренная форма нормализация по общему полю в конечно точке луча (метод ***Total-Fast)***.

Сначала рассмотрим нормализацию мощности падающего поля, основанную исключительно на антеннах, используемых в моделировании, и игнорирующую влияние геометрии рассеяния.

Для того, чтобы найти ***dθ, dφ*** в (3) как масштабные коэффициенты поля, необходимо, чтобы было удовлетворено следующее уравнение:

$$1 = \frac{1}{4\pi}\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \sin\theta \left[|d_\theta(\theta,\phi)|^2 + \left|d_\phi(\theta,\phi)\right|^2\right] \qquad (4)$$

Хотя нормализация по мощности подавляется, ***Savant*** только предполагает, что пользовательские таблицы диаграммы направленности и источников тока в дальней зоне дадут результаты, пропорциональные направленности по шкале поля. В файлах ***.patdat***, ***Savant*** представляет эти данные как $\boldsymbol{a_\theta}$, $\boldsymbol{a_\varphi}$, где $\boldsymbol{a_\theta = \sqrt{(P/4\pi)}\, d_\theta}$, $\boldsymbol{a_\varphi = \sqrt{(P/4\pi)}\, d_\varphi}$, и P является неизвестной мощностью излучения антенны. Во время предварительного этапа моделирования, P вычисляется программой ***Savant*** согласно выражению:

$$P = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \sin\theta \left[|a_\theta(\theta,\phi)|^2 + \left|a_\phi(\theta,\phi)\right|^2 \right] \qquad (5)$$

То есть, выборки немасштабированной диаграммы направленности антенны ***Tx*** (и антенны $\boldsymbol{R_X}$) ***Savant*** распространяет на всю сферу, а затем объединяет эти данные для определения ***P***, и применяет эту информацию для нахождения масштабного коэффициента так, что в дальней зоне результаты выводятся как направленность, а при нахождении ближнего поля и $\boldsymbol{R_X}$ связи результаты сравниваются с $\boldsymbol{T_X}$ антенной, которая излучает мощность 1 Ватт.

Строго говоря, ***Savant*** выводит масштабируемые результаты дальнего поля, чтобы получить значения ***gain***, а не ***directivity***. При отсутствии потерь, направленность и усиление антенны равны: $\boldsymbol{G = D}$. Однако, когда существуют потери, $\boldsymbol{G < D}$.

В процедуре нормализации, описанной выше, ***Savant*** не учитывает диссипативные потери в самой антенне. Это имеет смысл, так как ***Savant*** не моделирует непосредственно саму антенну и поэтому нужно сделать некоторые разумные предположения о характеристике самой антенны.

Тем не менее, ***Savant*** не моделирует потери в геометрии рассеяния из-за потерь материала покрытия. Когда они присутствуют, мощность излучения общего поля уменьшается по отношению к мощности общего поля, потому что мощность падающего поля уменьшается с учетом потерь в материалах. По этой причине в отчетах ***Savant*** результаты дальнего поля непосредственно не масштабируется, и в этом смысле имеются различия. Аналогично, ближнее поле и связь по ближнему полю масштабируются на 1 Вт при учете согласования линии передачи с учетом версии без потерь $\boldsymbol{T_X}$ антенны. Если геометрия рассеяния металлическая – т.е. покрытие без потерь, тогда результаты также соответствуют ***Tx*** антенне, которая излучает 1 Вт в пространство вокруг антенны и геометрии. Если в геометрии рассеяния имеются материалы с потерями, то результаты ближнего поля и связи

соответствуют антенне $\boldsymbol{T_X}$, излучающей менее 1 ватт в окружающее пространство.

До сих пор мы избегали один критический вопрос, который сейчас необходимо рассмотреть. Все вышесказанное верно при условии, что входная антенна находится не в непосредственной близости от значительных рассеивателей. Однако, даже в условиях без потерь, общее-поле излучения - в общем другое, чем падающее поле излучения. Например, рассмотрим источник тока величиной 1 А/м, расположенный в непосредственной близости от металлической пластины. Также предположим, что он представляет собой электрически короткий прямой провод, управляемый в центре идеальным генератором. Как правило, энергия работы, требуемая генератором для поддержания источника на 1 А/м, когда он находится в свободном пространстве, отличается от энергетических затрат, требуемых, когда источник находится рядом с пластиной. Другими словами, наличие пластины приводит к изменению входного импеданса антенны. Когда пластина удаляется от источника тока, это изменение уменьшается, и даже несмотря на то, что падающие и общие поля могут иметь разное пространственное распределение, их мощность излучения становится одинаковой.

Следовательно, этот сдвиг мощности важно учитывать в условиях, когда геометрия рассеяния существенно повлияла бы на входное сопротивление антенны (т. е. где она "загрузила" антенну). В большинстве случаев это происходит при наличии значительной геометрии рассеяния на расстоянии нескольких длин волн антенны.

Таковы также условия, при которых входные антенны должны характеризоваться источниками тока, а не моделями дальнего поля излучения. Однако, даже при использовании данных ДН дальнего поля, аналогичный сдвиг мощности может наблюдаться, и он имеет аналогичную интерпретацию.

Чтобы такой сдвиг происходил, нормализация падающего поля антенны ***Tx*** (или $\boldsymbol{R_X}$) может в пересчете дать ошибочный результат, хотя это не изменит пространственного распределения характеристик (например, формы ДН усиления). По умолчанию ***Savant*** выполняет нормализацию на основе общего поля. В частности, это вызывает метод расчета, известный в ***Savant*** как ***Total-Fast*** нормализация мощности. Подробнее этот и другие варианты ***Power Normalization,*** доступных в ***Savant,*** описаны здесь, и по умолчанию нормализация по мощности настраивается через расширенные функции

нормализации по мощности, в том числе ранее описанный нормализацию по падающему полю, что было как в ***Savant*** 18.0.

2.9 Покрытие поверхности материалом

Savant моделирует поверхности с материальными покрытиями на основе коэффициентов отражения и передачи Френеля. Таблицы этих коэффициентов либо рассчитаны с использованием стандартных методов физического описания покрытия с точки зрения диэлектрических слоев, либо их можно прочитать из предоставленного пользователем табличного файла.

Когда луч падает на поверхность, поля геометрического луча разлагаются в точке падения на поперечно-электрические (***TE***) (у нас волны ***H***) и поперечно-магнитные (***TM***) поля (у нас волны ***E***). Затем, в зависимости от материала покрытия, назначенного на поверхность и угла падения относительно нормали к поверхности, находятся коэффициенты Френеля ***TE*** и ***TM*** в виде таблицы. Они применяются к падающему полю для определения полей ГО отраженного луча. Если луч проникает через покрытие, то коэффициенты передачи Френеля также находятся из той же таблицы и применяются для определения полей прошедшего луча (рис. 2.1). Поскольку эквивалентные токи, находятся из общего поля ГО на поверхности на шаге 4) алгоритма ***SBR***, коэффициенты Френеля влияют не только на поля ГО отраженных и прошедших лучей, но и на результаты рассеянного поля.

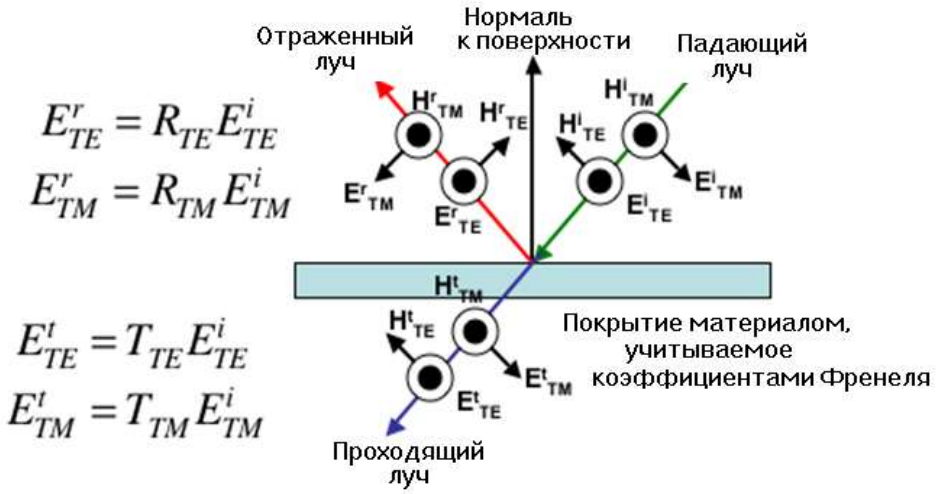


Рис. 2.1. Падающие и отраженные лучи на поверхности раздела сред

Коэффициенты Френеля получаются, полагая бесконечно широкую плоскую волну и слоистую плоскую поверхность, которая является бесконечной и неограниченной. Поскольку эти предположения никогда не

удовлетворяются - геометрия рассеяния конечна, редко плоская, а покрытия меняются из области в область - возникает вопрос о пригодности коэффициентов Френеля. То же самое возражение может быть сделано в отношении аппроксимации ФО, применяемой к металлическим поверхностям, но ФО является хорошо зарекомендовавшей собой аппроксимацией. Такой подход к учету покрытий по сути является обобщением традиционной ФО.

Это относится к не-искривленной поверхности, и охватывает определенный диапазон волн, использующих коэффициенты Френеля для определения ГО луча поля и эквивалентных токов, которые производят рассеянное поле, представляющее собой хорошее приближение фактического поля, которые можно измерять. Как и вся асимптотическая теория дифракции, будь то в ФТД или ГТД, идея заключается в решении канонической задачи (например, рассеяния плоских волн от однородных плоских поверхностей), а затем использовать результаты локально (то есть, над областью проекции лучевой трубки), используя локализованные геометрические и материальные условия, как если бы они преобладали до бесконечности.

Часто возникает вопрос о том, включает ли эта модель эффекты преломления, особенно если диэлектрические слои электрически толстые. Рассмотрим один диэлектрический слой. Общая картина из лучевой оптики состоит в том, что луч падает в диэлектрический слой из свободного пространства, изгибается из-за изменения показателя преломления, перемещается по слою, а затем возвращается при выходе из слоя. Следовательно, излучаемый луч движется в том же направлении, что и входящий луч, но он смещается. Отраженный луч также смещается. Кроме того, существует много отражающих и передающих лучей, исчезающих из-за внутреннего отражения в слое. Эта сложная картина, показанная слева на рис. 2.2а, находится в резком контрасте с простой диаграммой справа, которая показывает лучи, как они на самом деле прослеживаются в SBR. Обратим внимание, что покрытие конечной толщины проявляется только в коэффициентах отражения и передачи, применяемых к лучам ГО, а не в самой модели CAD тонкой поверхности (рис. 2.2б).

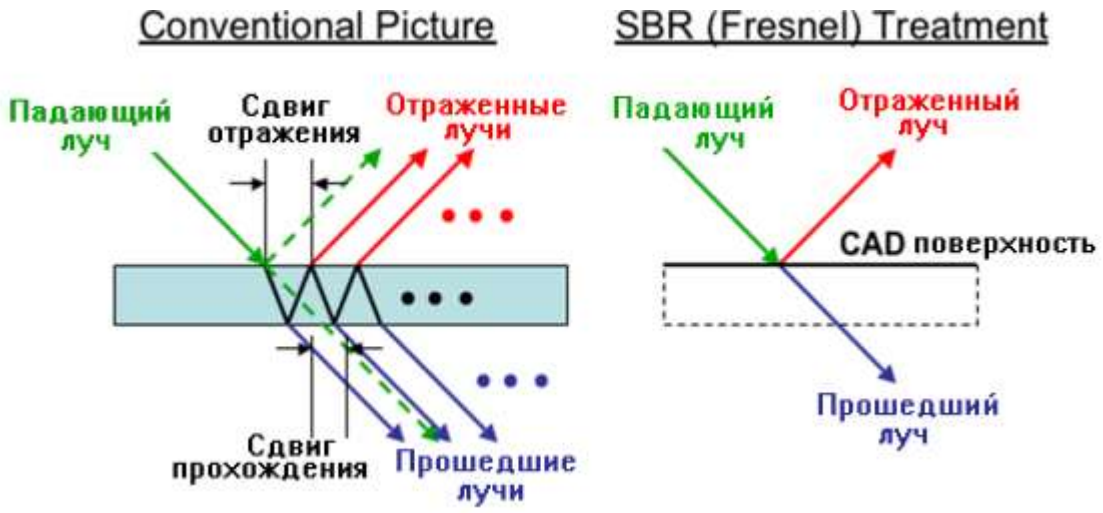


Рис. 2.2. Многократное отражение и преломление лучей

В методе ***SBR*** нет пространственного сдвига в прошедшем или отраженном луче, и несколько выходящих лучей не генерируются из-за внутренних отражений в слое. Опять же возникает вопрос о том, отсутствует ли в реализации что-то важное. Ответ в том, что ничего не пропало. Коэффициенты Френеля полностью учитывают влияние преломления и внутреннего отражения, но не так, как мы привыкли думать о нем.

Важно понять, что, хотя лучи прослеживаются индивидуально, отдельный луч без соседних имеет мало физического смысла. В ***Savant***, а также в ГО в общем случае, каждый луч - это выборка более крупного волнового фронта. Отдельные, изолированные лучи не преломляются, потому что отдельных, изолированных лучей даже не существует. Более полное изображение для ***SBR*** показано на рис. 2.3. Чтобы сохранить картину преломления, как это обычно понимают, можно думать об отраженном или переданном луче как о продолжающемся не первоначальном падающем луче, а об одном из его соседних.

Кроме того, многократно отраженные и прошедшие лучи являются продолжением другого соседнего луча. Весь эффект учитывается величинами модулей и фаз коэффициентов Френеля. Более того, если моделирование применяется к очень толстым материалам и выполняется в широкой полосе частот, при этом падающее поле преобразуется методом преобразования Фурье в узкий импульс во временной области, и в преобразовании Фурье рассеянных полей будет проявляться несколько внутренних отражений, происходящих в диэлектрическом слое.

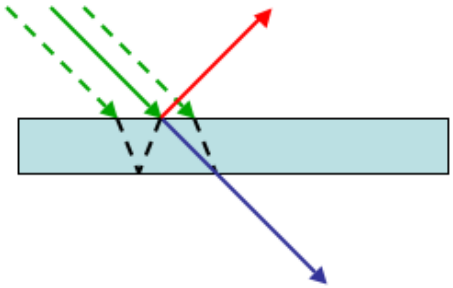


Рис.2.3. Падающие и отраженные от пластины лучи

2.10 Таблица коэффициентов отражения-передачи

Savant имеет встроенную возможность для описания материала покрытия через параметры, в том числе как металл (***PEC***), идеальный поглотитель, и многослойные диэлектрики. Внутренне они преобразуются в зависящие от частоты и другие характеристики таблицы коэффициентов отражения Френеля. Коэффициент Френеля основан на предположении о падении и отражении плоских волн и представляет собой отношение отраженного поля к падающему полю. Пакеты лучей могут представлять сложные волновые границы, и каждый луч представляет собой образец того волнового фронта, который считается локально плоским. При условии, что волновой фронт не слишком нерегулярен, а покрытия не слишком толсты по сравнению с их боковым масштабом, коэффициенты Френеля, применяемые в сочетании с отдельными лучами, обеспечивают хорошее приближение отражения произвольного волнового фронта от поверхности.

Для покрытий, которые не хорошо представлены встроенными типами (***built-in types***), ***Savant*** предоставляет возможность непосредственно загружать таблицы Френеля из внешнего файла. Пользователь может получить их из разных источников, включая аналитические формулы, специальные программы для моделирования покрытия (например, программа анализа частотно-селективной поверхности), или измерений. Существует два типа таблиц покрытия, поддерживаемых ***Savant***.

- Коэффициенты отражения
- Коэффициенты отражения + передачи.

Таблицы ***reflection + transmission coefficients*** объясняются позже.

Коэффициенты Френеля зависят от поляризации падающей плоской волны (рис. 2.4). Есть два уникальных, ортогональных поляризаций: с поперечными электрическими (***TE***) и поперечными магнитными волнами (***TM***).

Savant рассчитывает связь полей в соответствии с рис. 2.4. Тогда металл ***PEC*** имеет коэффициент отражения ***TE*** равный -1, а коэффициент отражения ***TM*** равный +1. В общем случае коэффициенты отражения - это комплексные величины, зависящие от угла падения и частоты.

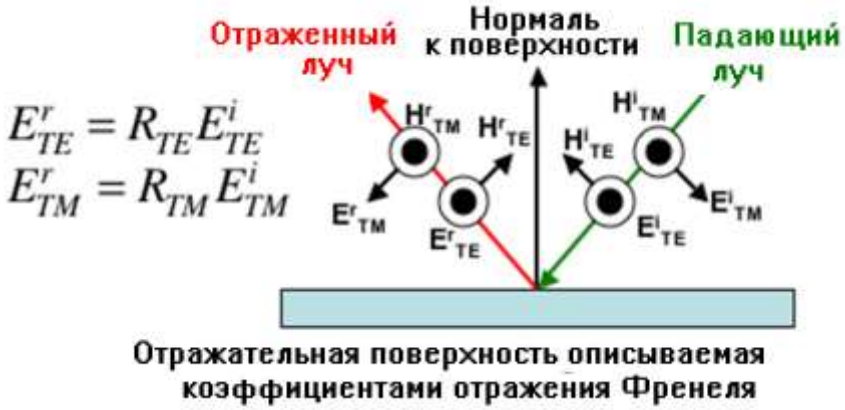


Рис. 2.4. Падающие и отраженные от поверхностного покрытия электрические и магнитные волны

Когда луч попадает на поверхность, ***Savant*** рассчитывает угол падения относительно нормальной поверхности. Лучевые линии падающего поля раскладываются по компонентам ***TE*** и ***TM***. Затем ***Savant*** ищет коэффициенты отражения ***TE*** и ***TM*** для этого угла, независимо от того, создается ли он внутренне или предоставляется внешней таблицей. Они применяются к соответствующим компонентам падающего лучевого поля для определения компонентов ***TE*** и ***TM*** отраженного лучевого поля.

Таблица коэффициентов отражения Френеля в формате файла в таблице описана в заголовке комментарии в примере ниже. Это для таблицы, определенной на одной частоте, что означает, что она будет использоваться на всех частотах во время ***Savant*** моделирования. Многочастотный пример представлен позже для таблицы отражения/передачи, но так как их форматы почти идентичны, одну и ту же кодировку можно использовать только для таблицы отражения.

Проницаемые покрытия, встречающиеся в случае навесов и покрытий, должны описываться как коэффициентами отражения, так и коэффициентами передачи. При создании многослойного диэлектрического покрытия в ***Savant,*** если указать материал подложки как воздух, то ***Savant*** будет рассматривать это как проникающее покрытие и внутренне генерировать как коэффициенты отражения и передачи. Аналогично, произвольное покрытия, проницаемые могут быть введены в виде таблицы в ***Savant.***

Когда луч попадает на проницаемые покрытия, он генерирует как отраженный луч, так и прошедший луч, как показано на рис. 6, что также расширяет поляризационную конвенцию предыдущей диаграммы. На приведенной ниже диаграмме специально показано, что переданный луч начинается не снизу, а сверху поверхности. В ***Savant*** модели ***CAD*** представляют бесконечно тонкие поверхности. Эффект толщины покрытия полностью учитывается в коэффициентах отражения и передачи.

Следовательно, при создании входного сигнала таблицы отражения + передачи для *Savant* важно сделать так, чтобы отсчетная фаза коэффициента передачи была от поверхности, ближайшей к падающему лучу. Таким образом, прошедший луч будет включать в себя правильную задержку фазы, учитывая, что он запускается с точно такой же точки, где падающий луч попадает на поверхность (рис. 2.5).

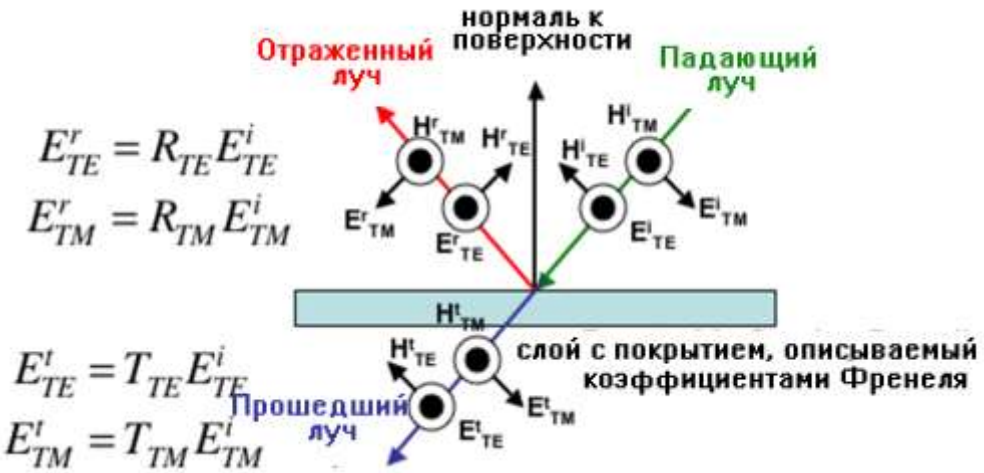


Рис. 2.5. Падающие и отраженные электрические и магнитные волны от поверхности

В следующем примере таблица ***reflection+transmission*** очень похожа по структуре на таблицу ***reflection-only***. Разница лишь в том, что каждая строка в таблице имеет четыре дополнительных числа, представляющих собой комплексные коэффициенты передачи ***TE*** и ***TM***. Этот конкретный пример также показывает, как задать частотно-зависимую таблицу коэффициентов.

2.11 Коррекция сходимости лучей на искривленной поверхности

В реализации метода ***SBR*** в программе ***Savant***, одномерные лучи трассируют на ***CAD***-модель и на самом деле представляют собой объемно-лучевые трубки, сечение которых точно выдерживаются с учетом

многократных отражений и передачи. В центре этих лучей находятся 1D лучи, показанные в визуальном трассировщике лучей.

Поскольку лучи запускаются из точки и представляют собой сферический волновой фронт, их площадь поперечного сечения увеличивается пропорционально $\boldsymbol{R^2}$, где $\boldsymbol{R}$ - расстояние распространения. Соответственно, поля лучевых трубок ГО уменьшаются как $\boldsymbol{1/R}$. Это известно как расхождение лучевой трубки. Когда луч (трубка) отражается от плоской поверхности, скорость расхождения луч-трубка остается неизменной, где $\boldsymbol{R}$ берется за общее расстояние пути луча при запуске от антенны $\boldsymbol{T_X}$.

Отражение от криволинейной поверхности сложнее. Когда лучевая трубка отражается от выпуклой поверхности, ее искривление увеличивает расхождение. При отражении от вогнутой поверхности скорость расхождения трубки уменьшается. Если поверхность имеет достаточную вогнутость, то трубка луча фактически начнет сходиться и пройти через одну или две каустики (точки фокуса) перед тем, расходиться снова. В этом процессе форма лучевой трубки меняется по мере её распространения. С ***CAD*** моделями, описанными на криволинейных поверхностях, ***Savant*** учитывает такой эффект точно, учитывая, что оба падающих волновых фронтов не-сферической кривизны (если луч уже отражается от другой криволинейной поверхности), а также локализованной кривизны в условиях ***CAD***-модели точки, в которую падает луч. Важно отметить этот эффект, так как он влияет на распределение и силу токов, текущих на поверхностях после отражения, и именно эти токи определяют рассеянное поле.

Граненые модели, состоящие из плоских полигонов (треугольников), не имеют явной информации о кривизне. Тем не менее, ***Savant*** имеет возможность автоматически восстановить кривизну из граненной модели, исследуя пространственные соотношения соседних граней. Грубо говоря, чем больше смещение нормали к поверхности двух соседних граней, тем больше кривизна в этой области геометрии. Используя полученную информацию о кривизне, *Savant* сможет применить коррекцию лучевой трубки и к граненым и к изогнутым поверхностям модели ***CAD***, позволяя реализовать более точную качественную криволинейную поверхность модели. Такое же извлечение кривизны также позволяет реализовать модель ползучих волн на граненых моделях, как будет описано ниже.

Начиная с ***Savant*** 18.0, по умолчанию учитывается кривизна для фасетной модели. При необходимости учет кривизны может быть снят с помощью функции отключения извлечения кривизны. Это позволит подавить коррекцию расхождения лучевой трубки и предотвратить с помощью модели ползучих волн с моделями ***Wedge*** (это невозможно сделать с криволинейной поверхностью модели ***CAD***). До ***Savant*** 18.0 извлечение кривизны по

умолчанию было отключено и должно было быть намеренно активировано для фасетных моделей.

2.12 Коррекция клиньев ФТД

Когда клинья (***Wedges***) извлекаются из металлических поверхностей фасеточной модели или загружаются из файла списка ребер (***wedge list file***), ***Savant*** будет применять коррекцию ФТД для повышения точности базового решения ***SBR***. Напомним, что ***SBR*** использует ГО, чтобы распространить ФО по нескольким отражениям. Поэтому первый шаг решения ***SBR*** - традиционное ФО, с помощью трассировки лучей определяет, какие поверхности будут освещены. Ограничение этого приближения состоит в том, что оно не учитывает искажения поверхностных токов в окрестности разрывов в геометрии, таких как острые кромки.

Например, рассмотрим металлическую пластину умеренного размера в длинах волн. В средней области ФО хорошо справляется с приближением токов. Однако, вблизи кромок пластины, ФО предполагает равномерные токи до границы кромки. На самом деле компоненты тока, перпендикулярные краям плавно уменьшаются до нуля, в то время как компоненты, параллельные краям, становятся очень большими. Эти неточные локальные токи не имеет большого значения возле зеркального рассеяния регионов (т. е., если ближнее ГО внутренних границ или пути выходных лучей в ближние и дальние поля), так как результирующее поле доминирует при изменении тока в большой области над платой, где ФО является точной. Однако токи вблизи ребер пластины оказывают сильное влияние на дифракцию в области тени и других областях, удаленных от заданных углов рассеяния. Таким образом, в то время как ФО (и ***SBR***) прогнозирует дифракцию в областях тени, нельзя ожидать, что она последовательно даст точные величины дифракции.

Теория ФТД первоначально была разработана для решения этой самой проблемы. Действие клина ФТД является асимптотикой, когерентно связанной коррекцией к ФО, так что предназначено для учета локальной неоднородности тока вблизи металлических клиньев и краев. Это несколько походит на коррекцию ГТД к ГО в этом смысле, за исключением того, что коррекции ФТД помягче, чем коррекции ГТД с ГО; ГО дает нулевое поле в теневой области, а ФО всегда дает конечные поля и это объясняется дифракцией.

Изначально ФТД была сформулирована как коррекционный член в рассеянных полях, а не как коррекция токов вблизи ребер, которые создают

эти поля коррекции. С точки зрения практических вычислений методология впоследствии была усовершенствована использованием ФТД с эквивалентными (искусственными) токами, протекающими вдоль кромок. Это иногда называют коэффициентами дифракции добавочной длины (***incremental length diffraction coefficients, IL DC***). С эквивалентными токами интегрируется 1D токи на ребрах вдоль фактического пути ребер на платформе. Для криволинейных клиньев эквивалентные токи основаны только на локальных условиях и изменяются вдоль кромки в зависимости от изменяющихся углов падений и углов рассеянного поля относительно геометрии клина. С точки зрения практических расчетов, основным преимуществом использования ***ILDC*** является то, что они позволяют применить ФТД для сложных геометрических форм, в виде 3-D моделей ***CAD***. Осуществление коррекции клиньев ФТД в ***Savant*** выполняется на основе этого подхода, и они эквивалентны нитевидным токам по краям.

Нужно отметить несколько ограничений коррекции клиньев ФТД в ***Savant***. Во-первых, их можно назначать только на металлические ребра. Для ребер с покрытием не существует правил коррекции ФТД. ***Savant*** дает предупреждения, чтобы показать, что коррекция не распространяется на клинья с одной или двумя неметаллическими (не ***PEC***) плоскостями; коррекция ФТД автоматически пропущена во время моделирования, когда встречаются клинья с покрытыми фасками. Во-вторых, коррекция применяется только на клинья, которые напрямую освещены ***Tx*** антенной, а не косвенно с краев с подсветкой благодаря многократным отражениям ГО. В-третьих, коррекция ФТД ценна только для точек наблюдения поля в порядке длины волны или более от точки рассеяния кромок. Это объясняется тем, что коррекция формулируется в терминах 1-D эквивалентных (искусственных) токов вместо распределения 2-D физических поверхностных токов вблизи кромки. Это ограничение не влияет на результаты дальнего поля, но может иметь значение для результатов ближнего поля, когда точки наблюдения слишком близко расположены к клину в модели ***CAD***. На самом деле коррекция ФТД на основе эквивалентных токов становится вырожденной, приближаясь к краям. Чтобы предотвратить это, ***Savant*** автоматически сужает поле коррекции, сгенерированное эквивалентными токами на небольших расстояниях от кромки. Например, на расстояниях 1.0, 0.5, 0.2 и 0.1 длины волны от заданного края применяются коррекционные члены, равные 98%, 90%, 60% и 28%.

2.13 Лучи дифракции на ребрах в ОТД

Когда ребра находится в металлических поверхностях фасетной модели или загружаются из файла списком ребер, традиционные лучи ГО могут быть дополнены другим классом лучей, которые создаются дифракцией на клиньях. Эти лучи называются лучами ***UTD*** (равномерной теории дифракции ОТД) в ***Savant***, так как они управляются единой теорией дифракции на металлических клиньях. Однородная теория дифракции, сформулированная ***Kouyoumjian*** и ***Pathak*** в 1974 году, является продолжением геометрической теории дифракции Келлера (ГТД).

В Savant используется более узкое определение ГТД, которое относится только к дифракции лучей на металлическом клине, в отличие от более общего определения ГТД.

Коэффициенты дифракции лучей в ГТД Келлера показывают особенности на падающие и отраженные теневые границы. Эти особенности были удалены в ***UTD***, давая описание дифракционных лучей, которые *однородно* действуют на всех углах.

Лучи ***UTD*** являются расширением лучей ГО, так же, как коррекция клина ФТД – это расширение излучения ФО. Без ***UTD*** лучей, только области модели ***CAD***, которые имеют линии видимости (***line-of-sight LOS***) или много-отраженные пути ГО к передатчику освещены. Это прямое и косвенное освещение осуществляется лучами ГО, запущенными с передатчика. С добавлением ***UTD*** лучей, части модели **CAD**, которые не имеют ***LOS*** или много-отраженные ГО пути к передатчику, также могут быть освещены, улучшая охват лучей на модели *CAD*. Этот тип непрямого освещения достигается тогда, когда лучи, создавая дифракцию передатчика на клиньях (которые обязаны быть в прямой видимости от передающей антенны, так как они предназначены для коррекции клиньев ФТД), в соответствии с однородной теорией дифракции. В результате ***UTD*** лучи попадали ранее на затененные точки на ***CAD***-модели. Следует отметить, что механизм ***UTD*** освещения не ограничивается областями тени: ***UTD*** лучи также могут создавать на участках ***CAD***-модели линии видимости от передающей антенны.

Наличие ***UTD*** луча не гарантируется для каждой точки модели. Определяющее свойство ***UTD*** луча - это минимальное расстояние действия, как у луча ГО. Эквивалентным выражением этого свойства является то, что луч ***UTD***, идущий от клина, лежит на конусе Келлера в точке дифракции. Угол, сформированный между падающим лучом и линией ребра в точке дифракции, определяет характерный полуугол конуса Келлера, ось которого

выровнена с ребром. Могут существовать части модели ***CAD***, которые не пересекают ни один из конусов Келлера, определенных передающей антенной и существующими клиньями. В этом случае должен быть учет блокирования распространения ***UTD*** лучей в некоторых областях. И наоборот, некоторые точки на ***CAD***-модели может быть освещены несколькими ***UTD*** лучами при наличии реальных путей ***UTD*** к этим точкам, благодаря действию нескольких клиньев.

Как только луч ***UTD*** запускается из клина, он ведет себя точно так же, как и другие лучи ГО в алгоритме ***SBR***. Он отражается, передается и поглощается при последующих отражениях, и либо достигает максимального количества отражений, либо двигается до бесконечности. Тем не менее, начальное состояние ***UTD*** луча при выходе из клина в значительной степени зависит от геометрии.

2.14 Моделирование методом SBR ползучих волн

Термин «ползучая волна» относится к полям, которые распространяются вдоль плавно изогнутых поверхностей. Так же, как конечные поля имеются в тени прямоугольной пластины из-за дифракции на кромках, так же конечные поля возникают в тени изогнутой поверхности из-за распространения ползучих волны.

Волны соскальзывания быстро распадаются по мере их распространения, так как они постепенно теряют энергию в пространстве по направлению движения. По мере прохождения изогнутой структуры, поля теневой области становятся слабее. Следовательно, в то время как волны соскальзывания продолжают распространяться на непрерывной гладкой поверхности, такой как сфера, токи, которые они создают на поверхности, важны только до определенного пройденного расстояния. Тем не менее, они являются важным механизмом в таких случаях, как предсказание полей под фюзеляжем самолета для антенны, установленной на верхней стороне самого фюзеляжа.

Волны соскальзывания движутся по геодезическим путям по выпуклой изогнутой поверхности. Это обобщение правила минимального расстояния пути, которое следует за электромагнитным распространением. Если рассматривать две точки на гладкой поверхности, то геодезический путь между ними находится на поверхности и минимизирует длину пути. Например, на шаре геодезический путь всегда является дугой на самой большой окружности. В общем случае, существует много геодезических

путей, и каждый из них, если немного искажен, никогда не даст более короткого пути.

Savant реализует модель ползучей волны в согласии с ФТД (основанной на токе). В рамках ГТД объект должен найти небольшое количество геодезических путей, которые начинаются в T_X и заканчиваются в точке наблюдения. Если наблюдатель находится вне поверхности, то искомые пути включают геодезическую кривую, которая в какой-то точке поверхности тангенциально излучает прямой луч через пространство в точку наблюдения. В рамках ФТД - это немного другое. Многие геодезические лучи будут запущены во всех направлениях из точки ***Tx*** источника тока в диапазоне 360º, по касательной к поверхности. Они прослеживаются без каких-либо точек назначения. По мере их распространения геодезические лучи "возбуждают" поверхностные токи, излучающие рассеянные поля из-за ползучей волны. Кроме того, поскольку наблюдаемые поля образуются излучающими токами, нет необходимости выводить касательные лучи, как в рамках ГТД.

Более того, учет поверхностной волны соответствует когерентно добавленной компоненты рассеянного поля к базовому решению ***SBR***. То есть, оба механизма одновременно способствуют рассеянию поля. В районах освещенной области в непосредственной близости от антенны ***Tx***, где ***SBR*** рассчитывает первое отражение лучей и лучи отраженных волн, при возбуждении токов, необходимо быть осторожным, чтобы исключить двойной учет механизмов рассеяния.

Волны соскальзывания, реализованные в ***Savant,*** описывают бегущие волны от источника, расположенного вблизи выпуклой поверхности. Реализация ползучих волн в ***Savant*** ограничена конкретными ситуациями:

- антенна ***Tx*** должна быть описана источниками тока;
- ползучая волна запускается и распространяется только на металлических поверхностях (***PEC***);
- ползучая волна будет продолжать распространяться, только если радиус кривизны поверхности остается больше ***0.2 λ***;
- ползучая волна движется только на выпуклых поверхностях.

Кроме того, волны соскальзывания распространяются только от источников антенн T_X , находящихся в пределах изогнутой поверхности менее ***λ/4***. Формула предполагает наличие источников в непосредственной близости от изогнутой поверхности, вдоль которой распространяются волны соскальзывания. Это ограничение ***λ*/4** может быть ослаблено в качестве расширенной пользовательской настройки, однако это не рекомендуется делать, так как это значительно нарушает предположения асимптотической

модели. При значительном ограничении этот порог расстояния приносит преимущества механизма ползучих волн для наиболее важных класс задач, требующих этот механизм: антенны, установленные на фюзеляжах и других больших, плавно изогнутых поверхностях.

Наличие поверхности, на которой стоит антенна передатчика означает, что поверхность, на которой возникает ползучая волна, освещена ближним полем $\boldsymbol{T_X}$ антенны. Это первое ограничение в формулировке ползучей волны, так как только описание источника в виде токов имеет достаточную информацию для генерации точных данных ближнего поля.

Формула ползучести волны ограничена поверхностями ***PEC***, так как не существует универсальной асимптотической формулы для поверхностных волн на покрытых поверхностях. Также асимптотическая природа требует, чтобы поверхность не изгибалась слишком резко. Пользователи могут ослабить (увеличить) порог максимальной скорости кривизны с помощью дополнительных настроек, но это может привести к неточным результатам.

Наконец, реализация не требует, чтобы геометрия рассеяния была глобально выпуклой, такой как сфера или эллипсоид. Однако ползучие лучи волн будут прекращаться при возникновении областей поверхностной вогнутости или седловинной кривизны (выпуклые вдоль одного основного направления, вогнутые вдоль другого). Опять же, это требование реализуется постановка, но это тоже можно понять с точки зрения правила расстояния минимального пути. Там, где поверхность становится вогнутой, кратчайший путь больше не лежит на поверхности, и вместо этого, прямая линия идет в пространство.

2.15 Узлы Wedges

Если вы выполняете действие Add Wedges на CAD-модели узла, Savant будет создавать узел клина в качестве дочернего узла под CAD-модели узла. Если не видите его в дереве проекта, разверните узел CAD-модель, чтобы открыть его. Выберите узел CAD-Model Wedge, чтобы автоматически определить клинья в CAD-модели или импортировать их (рис. 2.6).

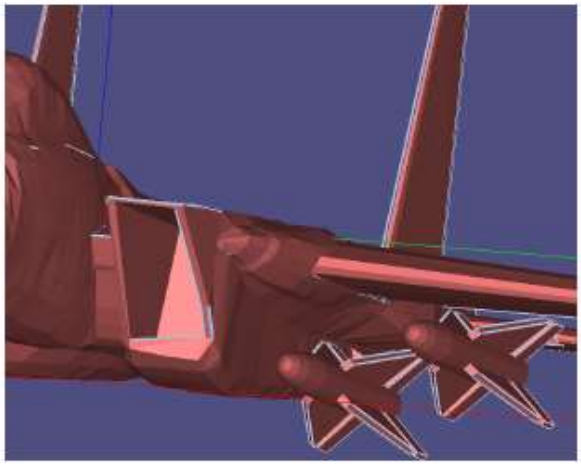


Рис. 2.6. Ребра, на которых генерируются токи

Автоматическое извлечение клиньев недоступно для криволинейной поверхности ***CAD***-моделей (например, моделей в формате ***iges***). Как обходной путь, модель клина можно создать внешне и после этого импортировать к таким моделям.

Следующие действия возможны благодаря нажатию на узел ***Wedges*** в панели свойств.

Visualize	Показать клинья в новом 3-D окне
Import Wedge File...	Импорт клиньев из файла в существующий проект. Клинья из этом файле заменяют текущие заданные клинья.
Export CAD...	Экспорт текущих ребер в другой файл
Rename	Переименование узла ***Wedges*** в дереве проекта
Delete	Удаление узла ***Wedges***

2.15.1 Редактирование действий ребра Wedge

Некоторые типы узлов в дереве проекта изменяют свои свойства при выборе поверхности в 3-D окне. Узел клиньев является одним из них, и его можно использовать для интерактивного создания отдельных клиньев, удаления отдельных клиньев или удаления партии клиньев.

2.15.2 Редактирование клиньев

Несколько операций редактирования клина можно выполнить, щелкая по модели. Лучше щелкнуть по середине кромки, а не по концам (рис. 2.7). Переключение режима на ***Hidden Wire-Frame*** также может сделать редактирование клина проще.

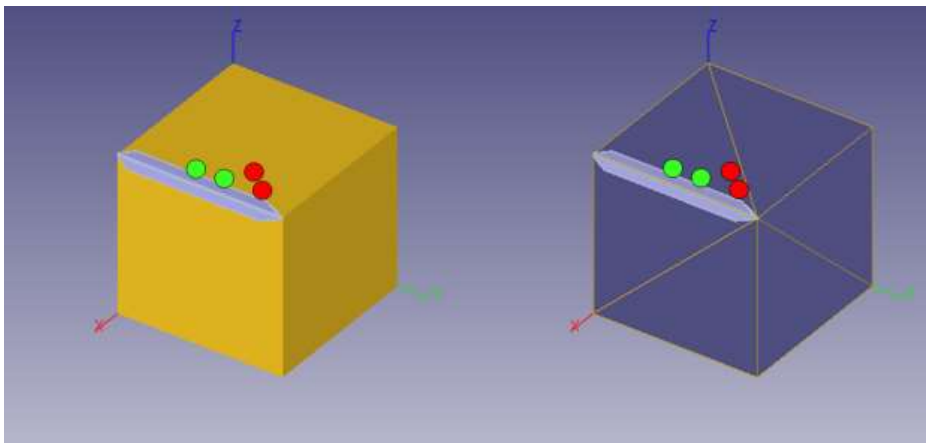


Рис. 2.7. Выделение клиньев на параллелепипедах

Операция редактирования находит ближайшую кромку к точке, выделенной на модели. На рис. 2.7 показаны потенциальные расположения кликов в виде красных и зеленых кругов. Клики по зеленому кругу расположены ближе всего к краю с серебристым затененным клинком на нем. Нажатие на красные точки не изменит эту кромку, поскольку красные точки ближе к диагонали верхней грани окна. Это ясно в виде проволочной рамки (справа), но не ясно в виде плоской тени (слева). Вот почему редактирование клина является более предсказуемым, если вы щелкните в середине ребра или использовать режим ***Hidden Wire-Frame***.

2.15.3 Интерактивное создание клиньев

Чтобы вручную создать один или больше клиньев, выполните следующие шаги:

1. Выделите узел клиньев в дереве проекта.
2. Убедитесь, что Rebuild Edges отключена. Иначе, интерактивное редактирование ребер может быть потеряно, если действие перестройки включено.

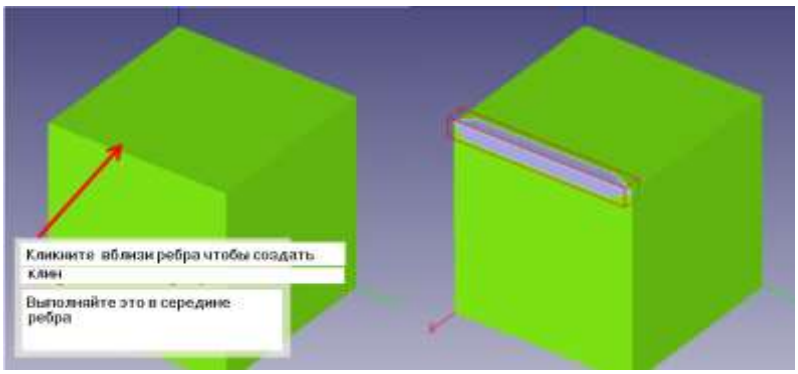


Рис. 2.8. Выделение и создание клиньев на ребрах

1. Убедитесь, что кнопка ***Edit Wedges*** нажата в ***3D Window Selection Toolbar***. Эти кнопки должны быть уже нажаты при выборе узла ***wedges*** на предыдущем шаге.
2. Сдвиньте курсор мыши в окно ***3-D view***. Положение мыши через фаску будет получено клин и ближайшее ребро, на котором вы хотите получить клин.
3. Выберите ребра для создания клиньев: Удерживая ***Ctrl*** и кликая левой кнопкой мыши. Клин должен появиться на фаске, который вы кликаете в ближайшем ребром к точке, которую вы кликаете.
4. Повторите действие на шаге 4 для создания дополнительных клиньев.

Клинья могут быть созданы только на кромках, которые еще не имеют клина и где угол между соседними гранями больше 180º. Если щелкнуть рядом с кромкой, уже имеющей клин, клин будет удален. Клинья также могут быть созданы по ***knife edges***, которые являются краями без прилегающей грани. Клинья не могут быть созданы на плоских кромках между копланарными гранями.

2.15.4 Интерактивное удаление клиньев

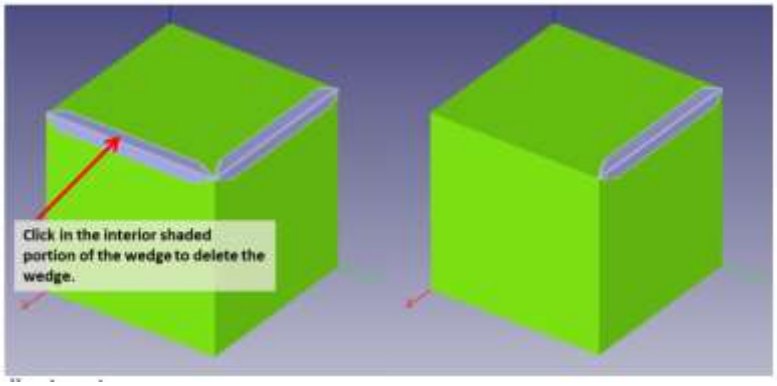


Рис. 2.9. Выделение и удаление клиньев с ребер

Для интерактивного удаления одного или более ребер, выполните следующие шаги:

1. Выберите узел **wedges** в дереве.
2. Будьте уверены, что ***Rebuild Edges*** отключена, как и в противном случае, удаленные клинья могут быть непреднамеренно восстановлены при каждом запуске действия перестроения.
3. Будьте уверены, что кнопка ***Edit Wedges*** нажата в ***3D Window Selection Toolbar***.
4. Переместите курсор мыши в 3-D окне, показывающий модель и на ребре, которые вы хотите удалить. Вы также можете расположить мышь на грани, прилегающей к клину, до тех пор, пока она ближе к краю клина, чем любые другие ребра.
5. Выберите ребро: нажмите клавишу ***Ctrl*** и кликните левую кнопку мыши. Ребра исчезнут. Положение курсора корректное для этого действия, может быть недоступно и может быть даже трудно для удаления ребер.
6. Повторите начиная с шага 4 чтобы удалить дополнительные клинья.

2.15.5 Удаление группы клиньев

Вы также можете удалить группу клиньев, которые находятся рядом друг с другом на экране, используя функцию, которую мы называем резиновой окантовкой. Функция резиновой окантовки позволяет рисовать прямоугольную границу на экране, которая удалит все клинья внутри области при отпускании мыши.

Чтобы удалить партию клиньев с помощью элемента резиновой ленты, выполните следующие действия:

1. Выберите узел **wedges** в дереве.
2. Убедитесь, что ***Rebuild Edges*** отключена.
3. Убедитесь, что кнопка **Edit Wedges** нажата.
4. Создайте выделение ребер, используя следующие действия с мышью:

   -Нажмите клавишу ***Ctrl*** и кликните и удерживайте левую кнопку мыши. Удерживайте клавишу и нажмите кнопку мыши.

   - При удержании клавиши ***Ctrl*** и левой кнопки мыши, протащите курсор поперек экрана. Тогда чертится красный прямоугольник.

-Отпустите мышь, когда область охватила ребра, которые вы хотите удалить. Ребра внутри области будут удалены, когда вы отпускаете кнопку мыши (рис. 2.10).

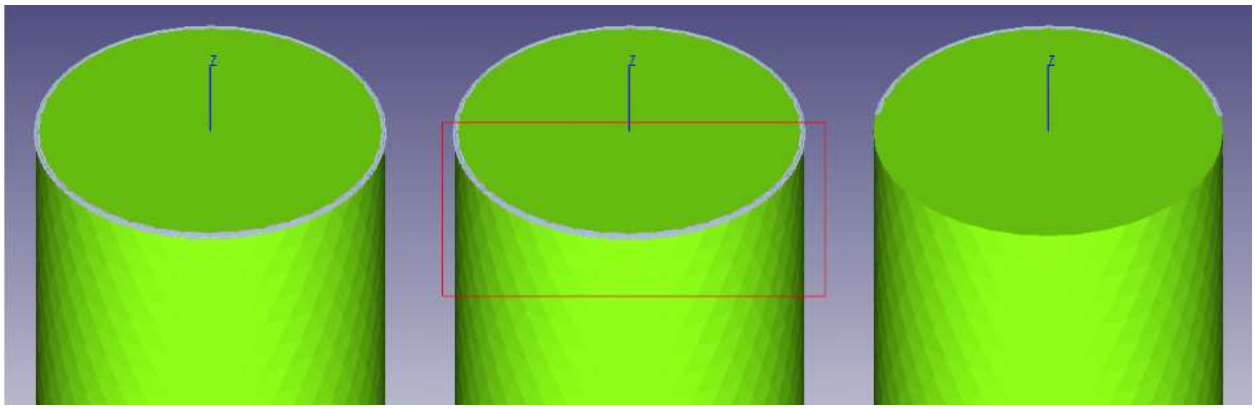


Рис. 2.10. Выделение клиньев для удаления

Обратите внимание, что клинья считаются находящимися внутри выделенной области и удаляются, если хотя бы одна конечная точка попадает внутрь красного прямоугольника.

2.16 Панель свойств ребер

Для импортированных файлов имя файла основано на импортированном имени файла. Для автоматически извлеченных клиньев файл будет называться на основе модели CAD: <cad-model-node-name>-wedges.wdg.

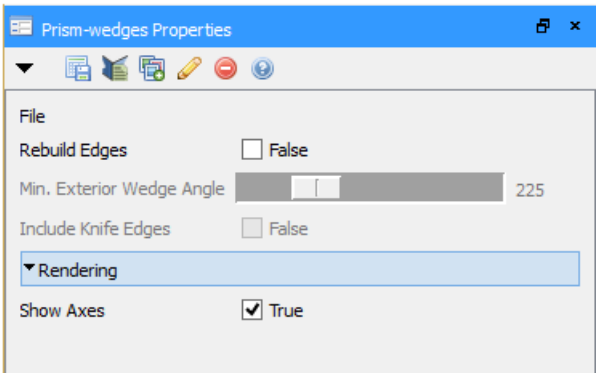


Рис. 2.11. Свойства ребер на призмах

Rebuild Edges: включение/выключение инструментов автоматического извлечения клиньев с ребер. Выберите эту опцию, чтобы включить автоматическую операцию извлечения клина. Выполните извлечение клина путем ***Min. Exterior Wedge Angle slider*** или ***Include Knife Edges toggle***.

Клинья будут извлечены в реальном времени и визуализированы в трехмерном виде сцены вместе с ***CAD***-моделью. Операция извлечения клина заменяет все существующие клинья (ранее импортированные или извлеченные) вновь назначенными клиньями.

При первом включении ***Rebuild Edges, Savant*** построит структуру данных топологии модели ***CAD***. Для больших моделей ***CAD*** построение топологии может занять некоторое время, и появится диалоговое окно хода выполнения. Сведения о топологии используются для ускорения операции извлечения клина.

***Min. Exterior Wedge Angle*:** минимальный внешний угол между гранями, необходимый для квалификации его в качестве клина. Настройка этого ползунка активирует операцию извлечения клина. Каждая пара соседних треугольников в модели проверяется на наличие большего угла между нормалями треугольников, чем угол, заданный ползунком. Если это так, то клин создается на общей кромке между соседними треугольниками.

***Include Knife Edges*:** включение острых кромок - это кромки любого треугольника, у которого нет связанного соседа. Например, внешний край треугольников по периметру плоской пластины. Включение этой опции приведет к выполнению операции извлечения клина, которая создает клинья на открытых несвязанных кромках треугольников.

Rendering Panel Folder- открытие папки панели, чтобы изменить способ отображения клиньев. Настройки применяются ко всем окнам трехмерного просмотра, в которых отображаются клинья. Клинья отображаются как пара трапециевидных граней, имеющих общую сторону на краю.

Show Axes: включение/выключение отображения осей координат.

Fill Color: настройка цвета внутреннего заполнения клиньев.

Border Color: настройка цвета отображения внешней границы клиньев

Wedge Width Fraction: Регулировка отображаемой ширины (внутреннюю область) клиньев вдоль их двух граней.

Line Width: Установка количества пикселей, используемых для отображения периметра клина.

Show Axes: включение/выключение отображения осей координат группы сцен.

3 БАЗОВЫЕ ОПЕРАЦИИ SAVANT

Рассчитаем диаграмму направленности (ДН) монопольной антенны, установленной на земляной плоскости 10λ x 10λ. Рассмотрим концепцию сцен, области рассмотрения, установки методов анализа и вывод результатов расчета.

Последовательность действий в этом примере:

1. Добавление параметрической ***CAD*** модели земляной платы;
2. Добавление короткой дипольной антенны в проект:;
   Метод 1: Загрузка ДН антенны из файла;
   Метод 2: Использование встроенных в ***Savant*** типов антенн;
3. Размещение антенны в конструкции (сцене);
4. Задание области расчета в дальней зоне (в секторе сферы);
5. Установка частоты и метода расчета;
6. Запуск на расчет и вывод результатов.

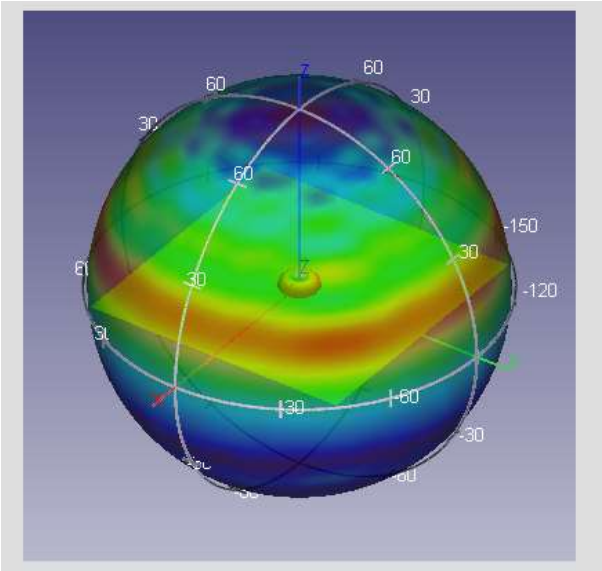


Рис. 3.1. Антенна над земляной платой

3.1 Начало моделирования

Программу ***Savant*** можно запустить из программы ***HFSS ANSYS***, из командной строки, командой ***isavant***. Для этого, инсталляционная директория ***Savant*** должна быть включена в путь системы как системная переменная. Появляется главное окно ***Savant***. Оно содержит меню, инструменты, дерево проекта и окно **3D-Scene**.

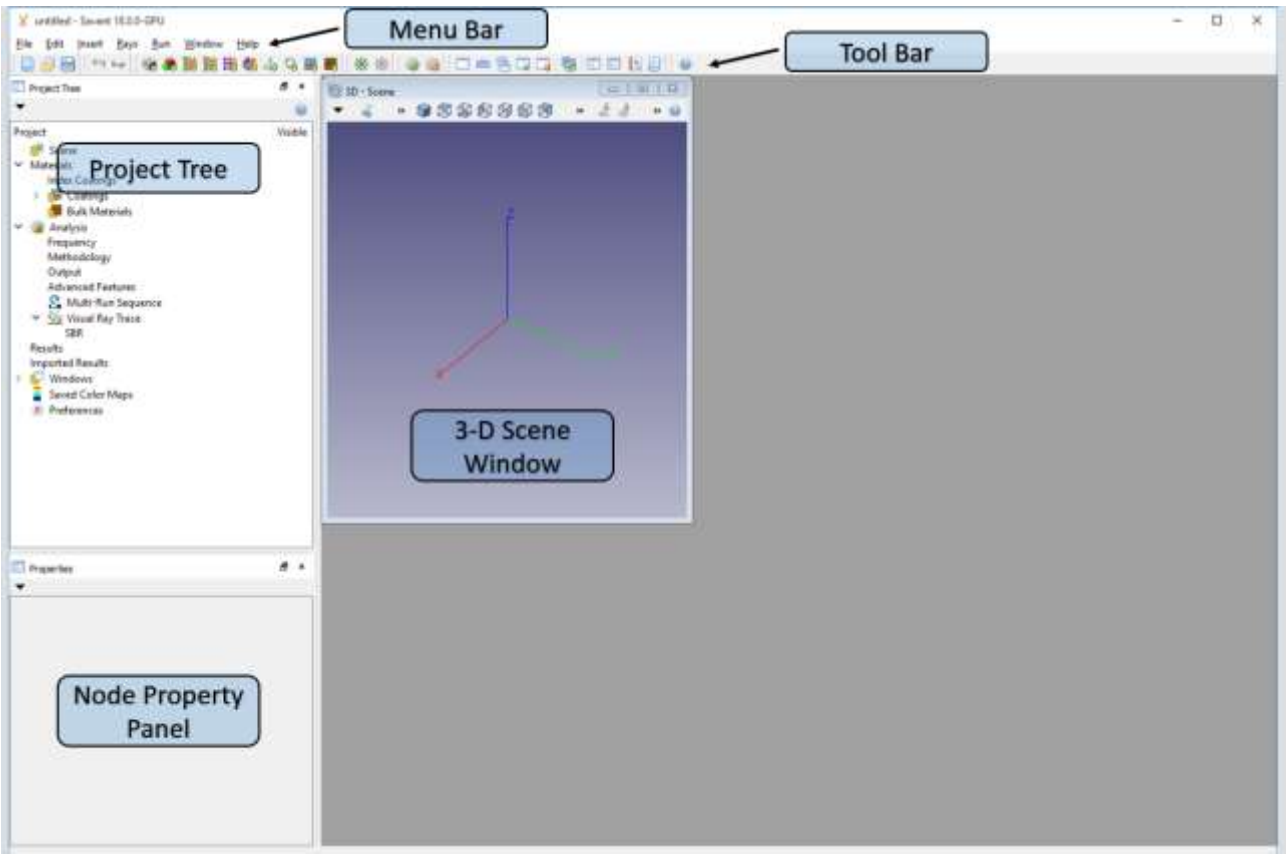


Рис. 3.2. Главное окно программы ***Savant***

Расчет будем вести на частоте 10 GHz. Добавим модель в виде земляной плоскости ***10λ x 10λ***. Для этого в главном меню ***Savant*** кликните кнопку ***Add Parametric CAD***. Будет показано окно ***3D-Scene*** с моделью плоскости (рис. 1.2) ***Plate***.

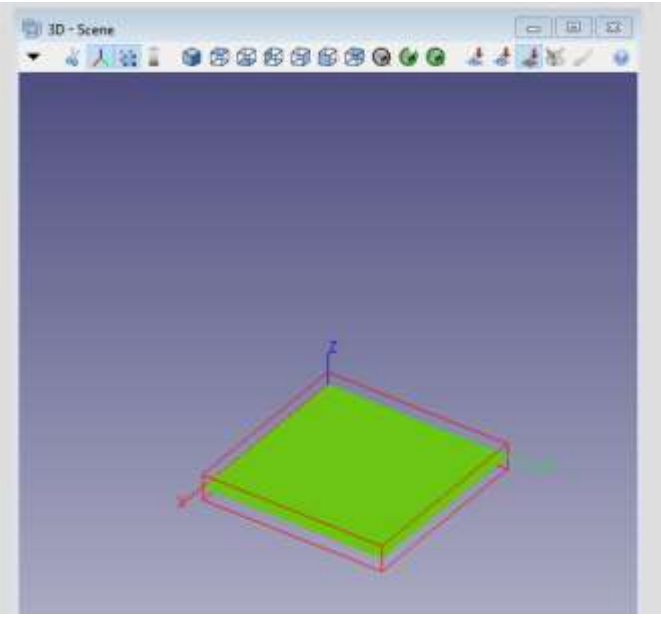


Рис. 3.3. Параметризируемая плоскость

Параметрическая модель **Parametric CAD** означает, что можно выбирать её геометрическую форму и положение, изменяя параметры. Измените поля ***Length (m)*** и ***Width (m)*** на величины **0.3**. В разделе ***Position (m)*** измените значения *X* и *Y* на -0.15.

Отключите ***Show Axes*** (рис. 1.4). Этим отключится вид осей в узле ***Plate.*** Начало системы координат теперь находится в центре плоскости.

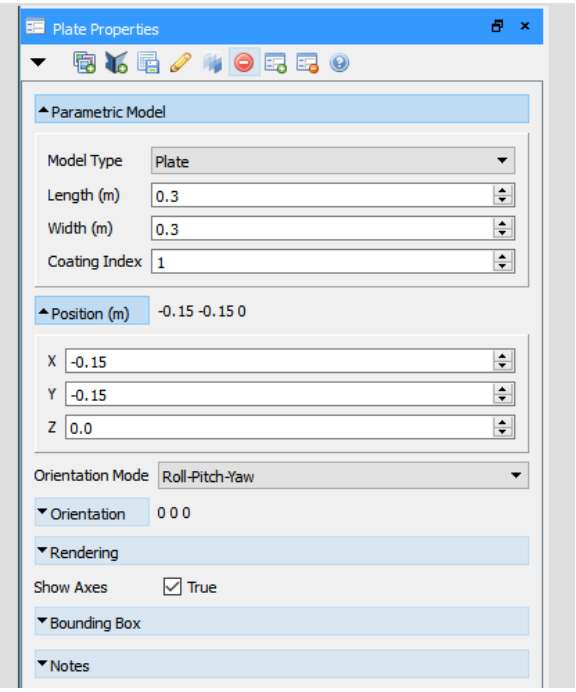


Рис. 3.4. Диалог свойств земляной платы

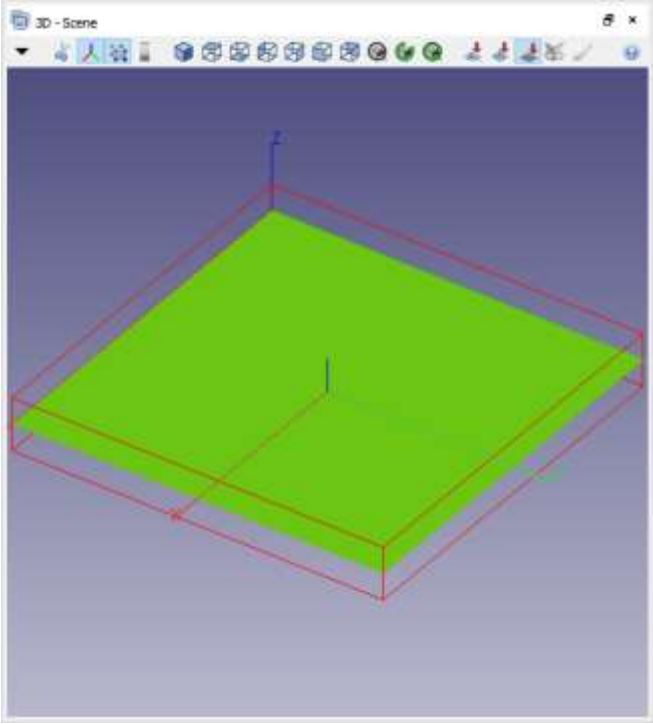


Рис. 3.5. Начерченная плата размером 0.3 м x 0.3 м

Разверните узел ***Materials***, используя правую кнопку мыши и затем выбирая ***Expand All***. Это высвечивает все узлы ***Materials*** для дочерних узлов. Например, индекс покрытия можно найти, в узле ***Materials:Index Coatings***.

В узле ***Materials:Index Coatings*** можно создать различные материалы покрытий, назначенные на разные поверхности модели CAD. В этом примере только один индекс покрытия поверхности, ***Coat Index 1*** (рис. 1.6). Сохраним его по умолчанию, как **Metal (PEC).**

Окно ***3D-Scene*** покажет геометрию в виде квадратной плоскости (рис. 3.7).

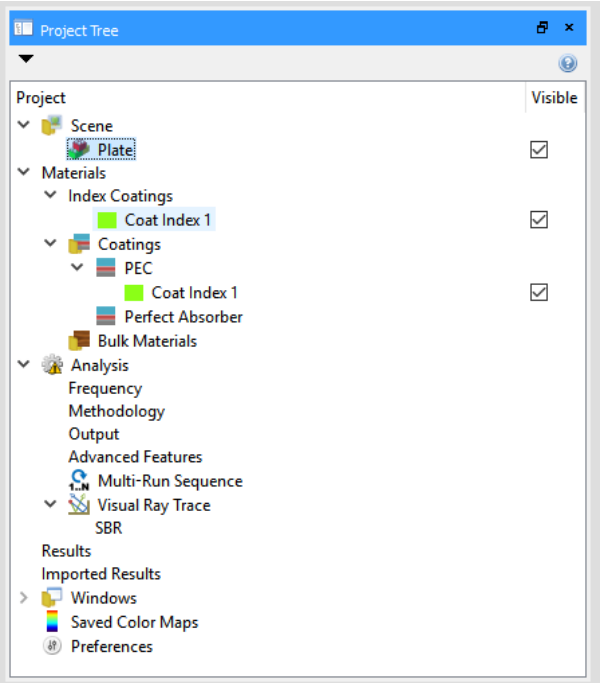


Рис. 3.6. Задание индекса покрытия как металла

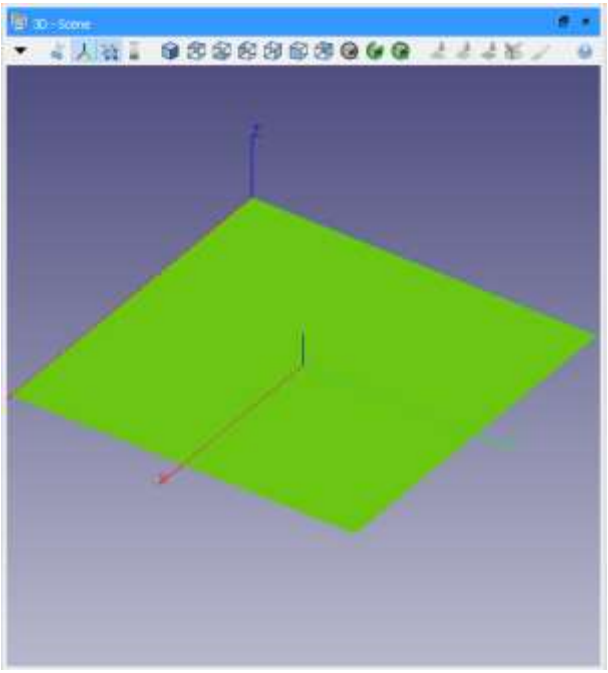


Рис. 3.7. Земляная плата и антенна над ней

Выберите узел ***Plate*** в дереве проекта (рис. 1.6). Красная прозрачная коробка вокруг квадратной плоскости очерчивает модель всякий раз, когда в дереве проектов выбран узел модели ***CAD*** или его родительский узел. Он также отображается для других типов узлов, которые имеют 3-D представление в сцене.

3.2 Изменение угла просмотра модели

Чтобы вращать вид просмотра структуры, можно, сдвинув курсор мыши в окно ***3D Scene***, и удерживая левую кнопку мыши, сдвигать положение мыши.

Чтобы увеличить вид, нажмите среднюю кнопку мыши и прокрутите колесико мыши.

Если у вас нет колесика прокрутки мыши, вы можете вместо этого удерживать клавиши ***Ctrl*** и ***Shift*** и перетаскивать вверх/вниз с нажатой главной кнопкой мыши. Кроме того, можно использовать клавиши ***PgUp*** и ***PgDown-keys***. Можно также использовать кнопки на панели инструментов в верхней части окна 3D-сцены.

3.3 Переименование узла

Кликните правой кнопкой мыши на узел **Scene: Plate** в дереве проекта. В выплывающем меню показывается список действий, которые можно выполнить с узлом ***Plate parametric CAD***.

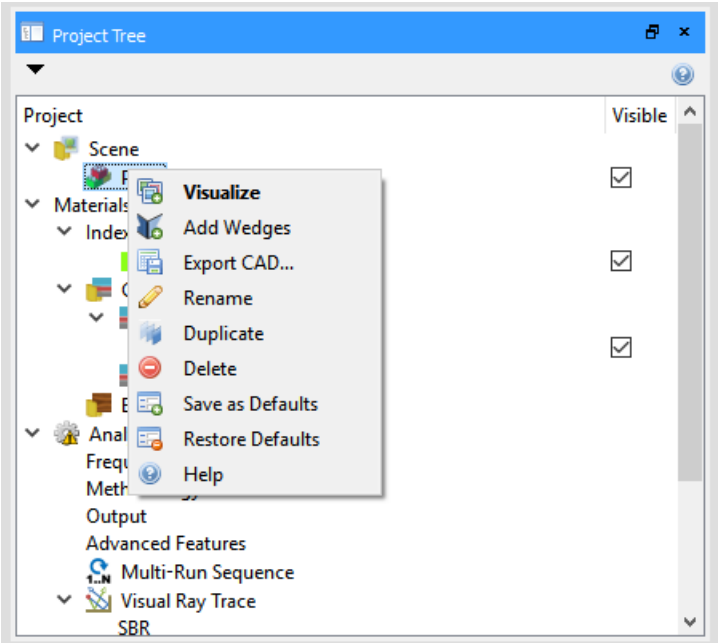


Рис. 3.8. Команды, которые можно применить к элементу сцены

Выберите команду ***Rename*** из списка команд и измените имя на ***ground_plane*** и нажмите ***return***. Сохраните проект в директории ***Tutorial1*** с именем ***Tutorial1*** (рис. 1.9).

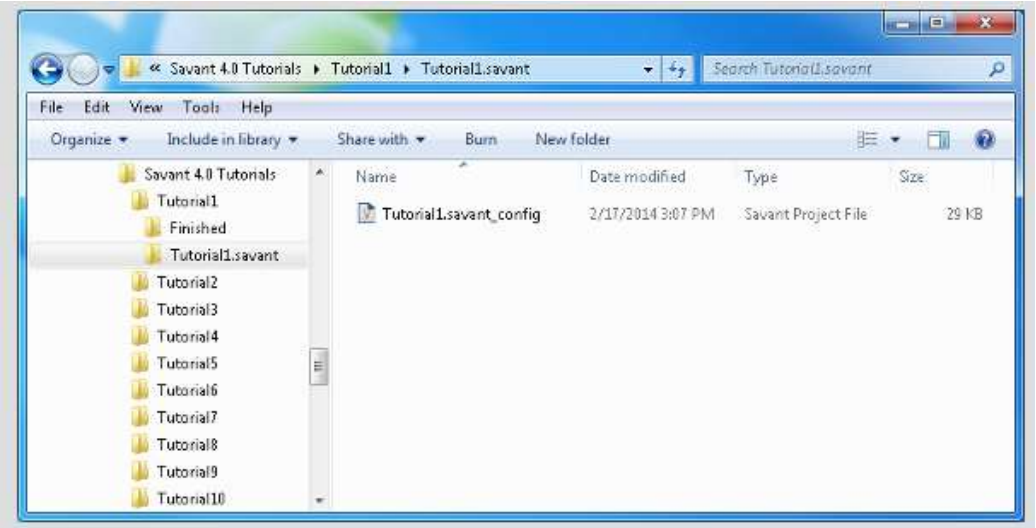


Рис. 3.9. Сохранение проекта *Savant*

3.4 Добавление короткой дипольной антенны к сцене проекта

Имеется два метода, которыми антенна может быть добавлена к сцене. Первый – загрузка из файла, второй подход – использование встроенных типов антенн в ***Savant***. Мы рассмотрим оба подхода.

3.4.1 Добавление антенны из файла

В дереве проекта, кликните правой кнопкой мыши на узел ***Scene***.

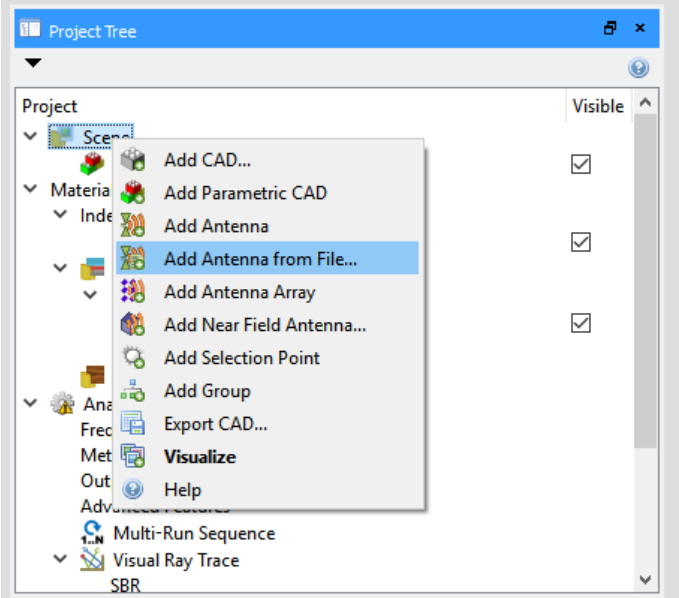


Рис. 3.10. Добавление ДН антенны из файла

Выберите команду ***Add Antenna from File..*** и в директории ***Tutorial1*** дважды нажмите файл ***shdip.patdat***. Загружается ДН антенны, и в узле ***Scene*** появляется новый узел ***shdip*** (рис. 3.11).

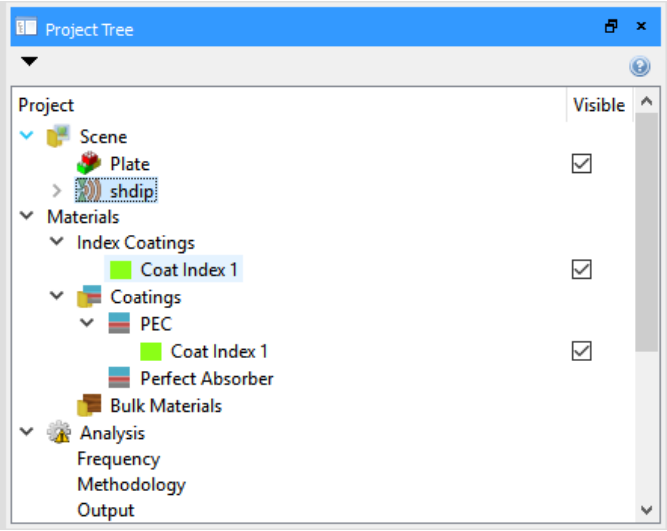


Рис. 3.11. Индексы покрытия поверхностей

Переименуем узел ***shdip*** на ***short_dipole***. Теперь антенна готова для моделирования. Однако целью этого пример является исследовать и второй метод создания антенны – добавление антенны из библиотеки встроенных типов антенн программы ***Savant***.

Кликните правой кнопки мыши на узел ***short_dipole*** и выберите ***Delete*** для удаления существующей антенны. В дереве проекта, кликните правой кнопкой мыши на узел ***Scene*** и выберите команду ***Add Antenna***.

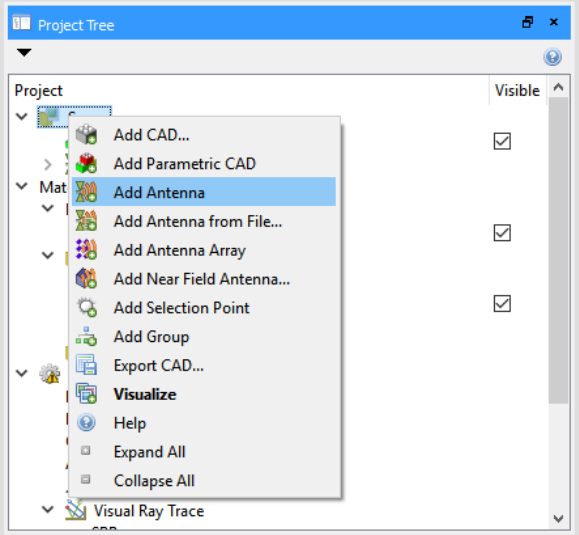


Рис. 3.12. Команда добавления антенны

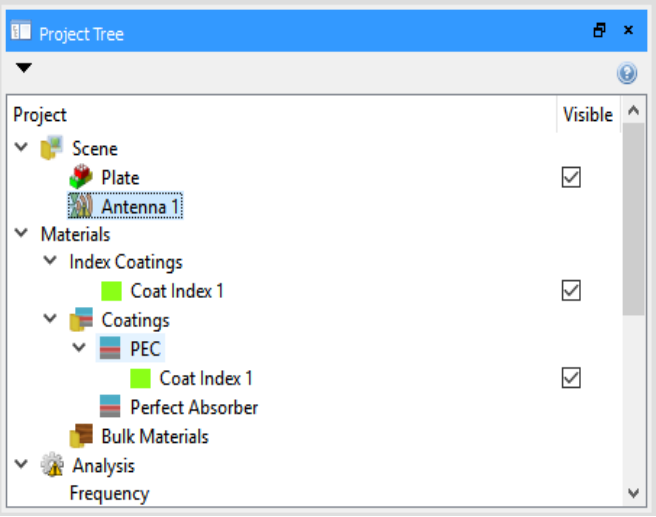


Рис. 3.13. Добавление антенны в проект

Появится новый узел ***Antenna 1*** (рис 3.13).

Переименуем узел ***Antenna 1*** на ***short_dipole*** и нажмите ***Enter***. При выборе узла дерева панель свойств отображает параметры узла. Панель свойств находится под деревом проектов в левом нижнем углу главного окна ***Savant*** (рис. 3.14).

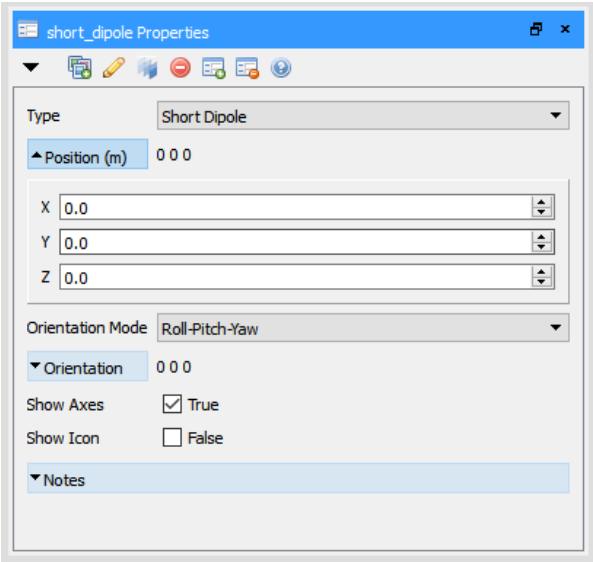


Рис. 3.14. Диалог параметра короткого диполя

Выберите из раздела ***Type*** короткий диполь ***Short Dipole.***

Теперь антенна загружена в сцену. В окне 3D-сцены вы увидите трехмерную ДН излучения короткого диполя (рис. 3.15), пересекающего плоскость земли. В разделе **Pattern** видим, что по умолчанию поляризация ***Composite*** (комбинация вертикальной и горизонтальной поляризации) и ДН - в линейном масштабе ***Linear***.

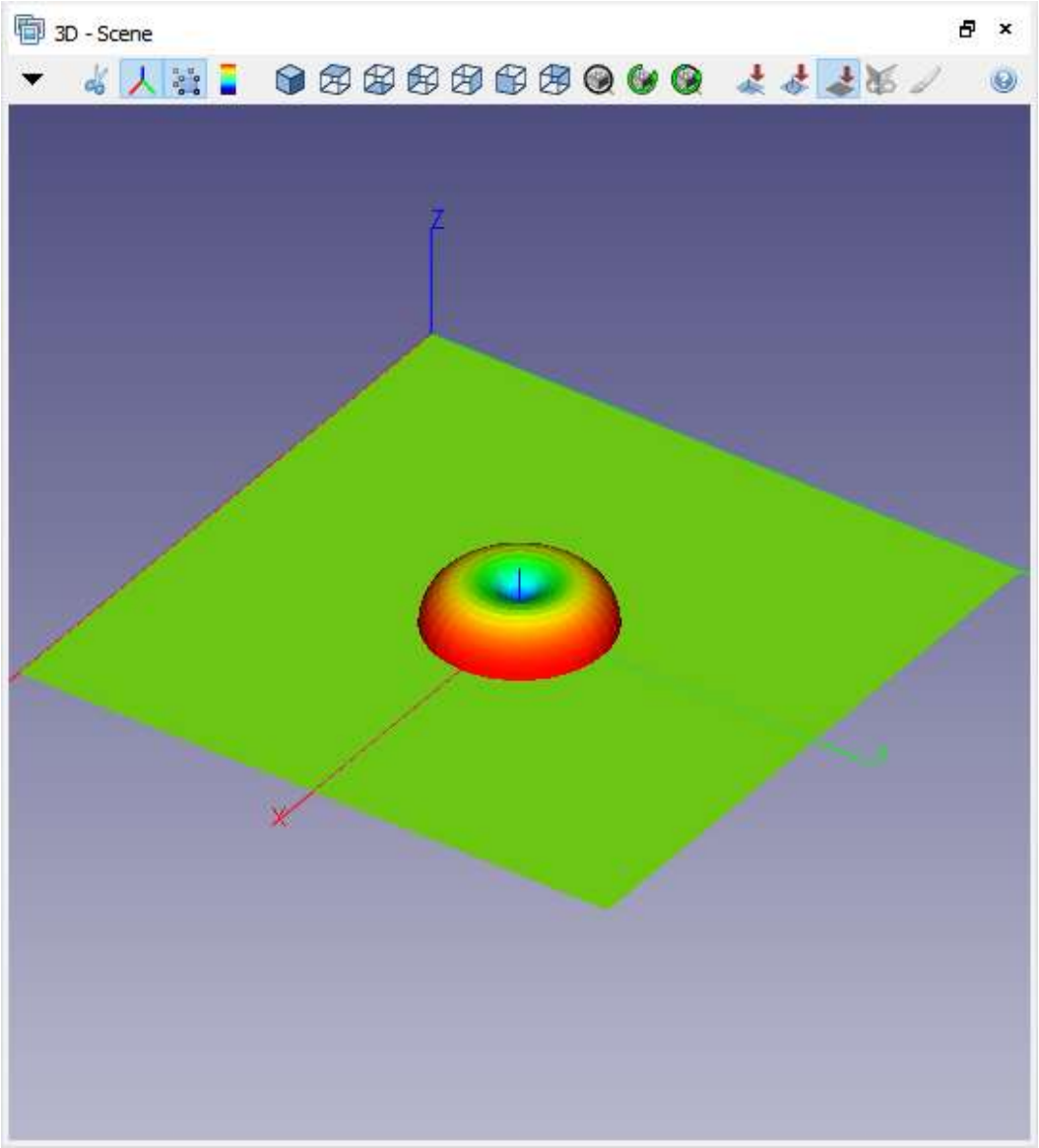


Рис. 3.15. ДН короткого диполя стоящего над металлической плоскостью размером 0.3 м х 0.3 м

Если выбрать узел ***Scene*:*short_dipole,*** и раскрыть раздел Pattern, то в панели его свойств можно изменять различные настройки короткого диполя (рис. 3.16).

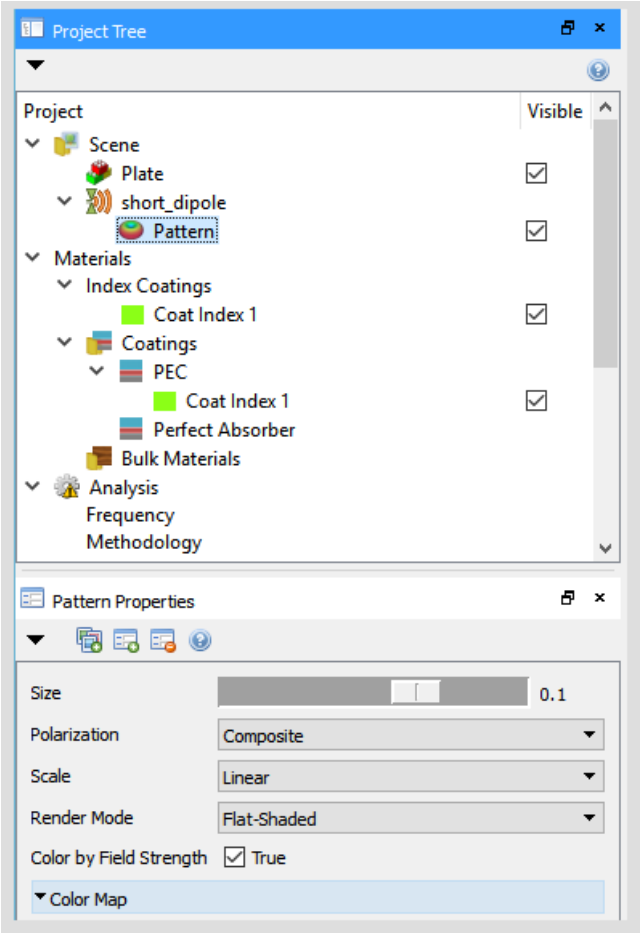


Рис.3.16. Окно изменения свойств ДН

Изменяйте эти настройки (рис. 3.16) и наблюдайте, как результаты отражаются в окне ***3D–Scene***.

3.4.2

3.4.3 Бокс, ограничивающий антенну

В окне ***3D-Scene*** обратите внимание на прозрачную красную рамку вокруг антенны, когда в дереве выбран параметр **short_dipole**. При выборе различных узлов в дереве проектов видно, как ограничивающий бокс отслеживает выбранный узел, а также полностью исчезает при выборе узла ***Materials*** (и большинства других узлов).

Когда выбирается узел ***Scene***, ограничивающий бокс снова появляется. В сложной конфигурации, включающей несколько антенн, этот бокс будет служить визуальной информацией идентификации узлов, представляющих интерес.

3.4.4 Размещение антенны в сцене

Мы будем моделировать характеристики монопольной антенны, установленной на квадратной плоскости размером 10 длин волн. В ***Savant*** это делается путем размещения дипольной антенны очень близко к поверхности отражательной плоскости.

Выберите узел антенны ***short_dipole*** в дереве проекта. В панели свойств узла (внизу дерева), кликните на ***Position (m)***. Установите положение (***X,Y,Z***) равным (0.0, 0.0, 0.001875) (***meters***), рис. 3.17.

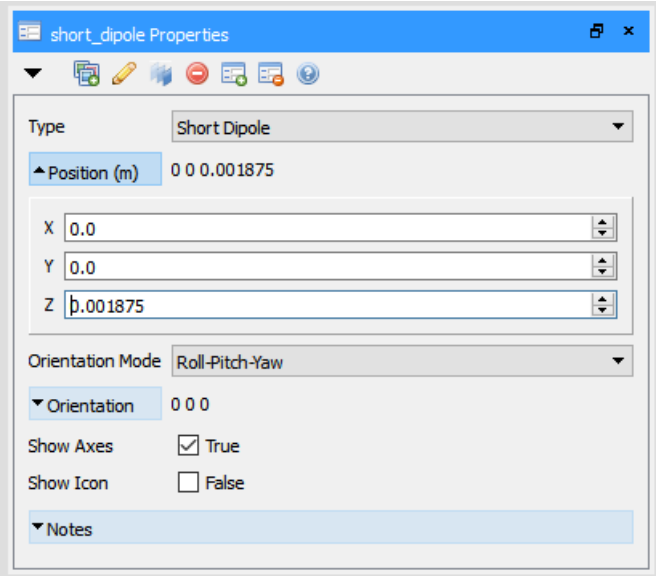


Рис. 3.17. Положение антенны в виде короткого диполя

Величина Z=0.001875 м была выбрано, чтобы поднять антенну на ***λ/16*** от поверхности земли (при ***Z=0***) на частоте моделирования 10 ГГц. В ***Savant***, когда вы хотите поместить антенну непосредственно на поверхность платформы, вы никогда не должны размещать её точно на поверхности, так как это создает неоднозначность для трассировки лучей. Вместо этого, поместите её на одной стороне поверхности платформы в соответствии со стороной для освещения, и расположите её на расстоянии ***λ/16*** или менее.

Размер дипольной антенны можно подстроить, если выбрать узел ***short_dipole: Pattern*** и регулировать слайдер ***Size*** для изменения размера ДН от значения, по умолчанию 0.1, до примерного значения 0.05 (рис. 1.18).

Обратите внимание, что отображаемый размер дипольного рисунка уменьшился в окне ***3D-Scene***. ДН антенны не имеют абсолютного масштаба для установки эталонного размера. Вместо этого размер физической сцены задает базовый размер шаблона антенны. В этом случае размер ДН антенны был уменьшен с 10% до 5% от общего размера сцены (рис. 3.18).

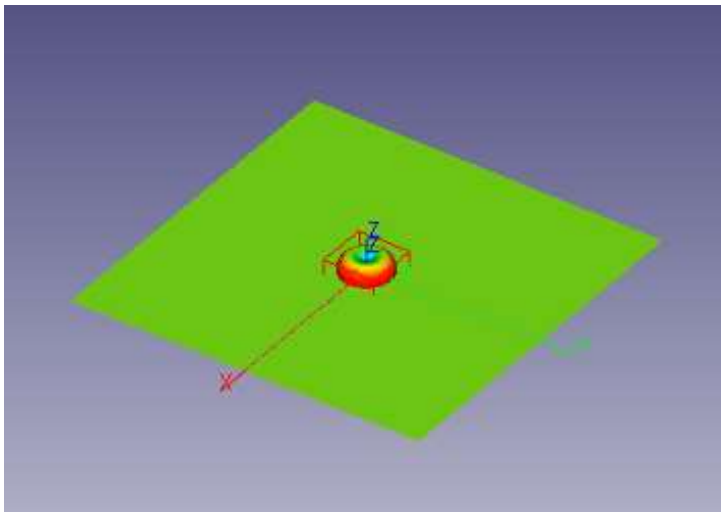


Рис. 3.18. Измененный размер антенны над земляной плоскостью

3.4.5 Область расчета характеристик дальнего поля (сфера углов)

Нам нужно рассчитать ДН установленной антенны во всей сфере излучения. Чтобы сделать это, нужно выбрать область наблюдения: азимутальные и меридиональные углы, на которых ***Savant*** будет рассчитывать излучение антенны в дальней зоне.

Выберем тип анализа ***Analysis Type*** как ***Far-Field Pattern*** (рис. 3.19).

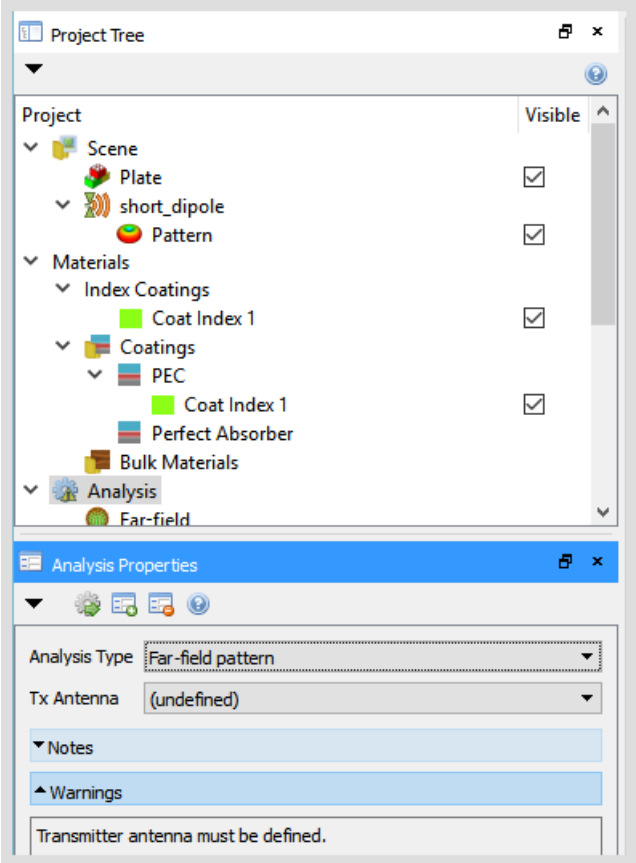


Рис. 3.19. Выбор расчета ДН дальнего поля

При выборе этой характеристики (рис. 3.19) в окне ***3-D scene*** появляется окружность дальнего поля с углами наблюдения (рис. 3.20).

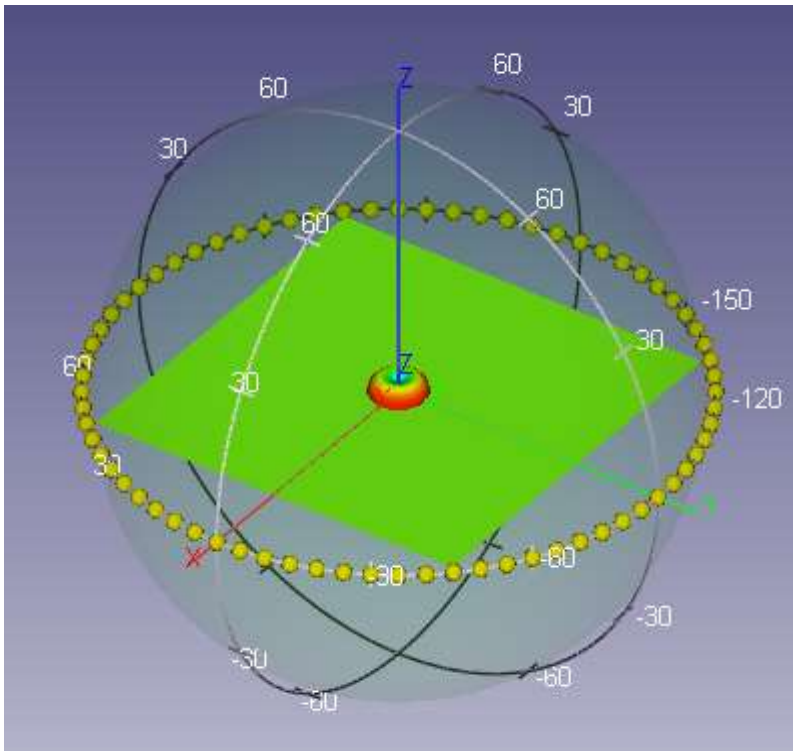


Рис. 3.20. Монопольная антенна на плате и азимутальная ДН

Поскольку у нас одна антенна, она и будет передающей антенной **Tx**. В панели свойств ***Analysis***, в разделе ***Tx Antenna*** выберите ***short_dipole*** (рис. 3.21).

При нахождении антенны в свободном пространстве диаграмма направленности ***short_dipole*** будут использована для возбуждения лучей, которые будут запущены в ходе моделирования.

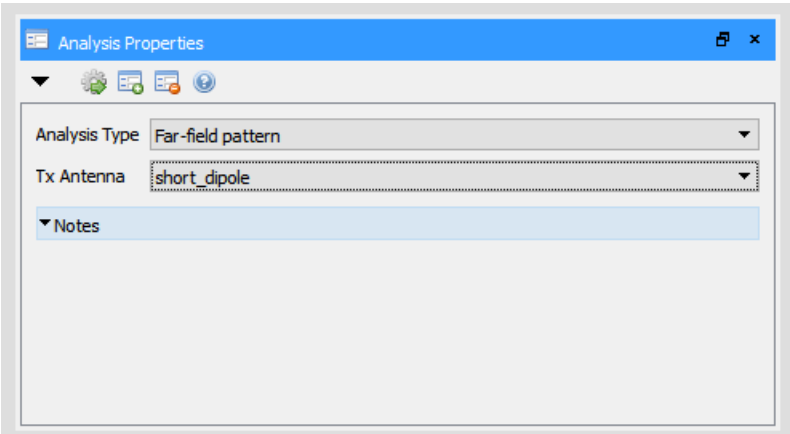


Рис. 3.21. Выбор антенны и расчета ДН

3.4.6 Конфигурация области углов дальнего поля

Выберите узел ***Far-Field*** в сцене проекта. Появляется панель свойств дальнего поля с узлом области просмотра (рис. 3.22).

Кликните на селектор ***Far-Field Type*** и выберите опцию ***Sector***. ***Sector*** означает выбор однородной сетки изменения углов в азимутальной и меридиональной плоскостях.

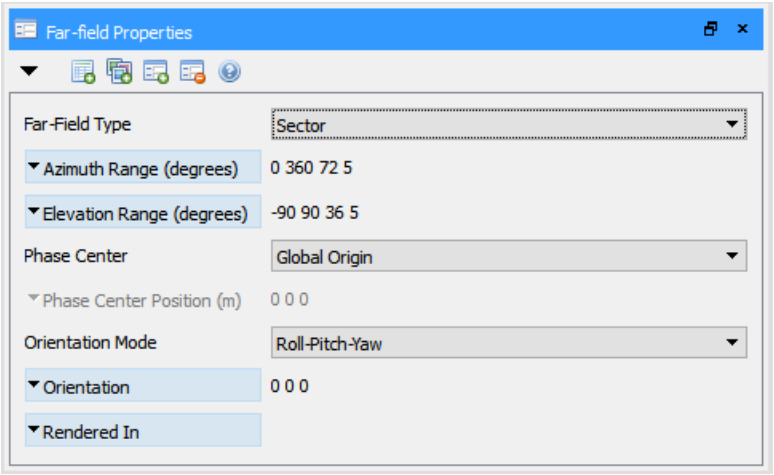


Рис. 3.22. Выбор пространственных углов сектора, в котором будет выполняться расчет ДН

3.4.7 Конфигурация углов по азимуту

Разверните панель ***Azimuth Range (degrees)***. Задайте следующие величины в полях углов: ***Start***: 0, ***Stop***: 180, ***Number of Steps***: 45 (рис. 3.23).

Интервалы между углами ***Delta*** автоматические становится равной 4º. Непосредственно задать ***Delta*** нельзя.

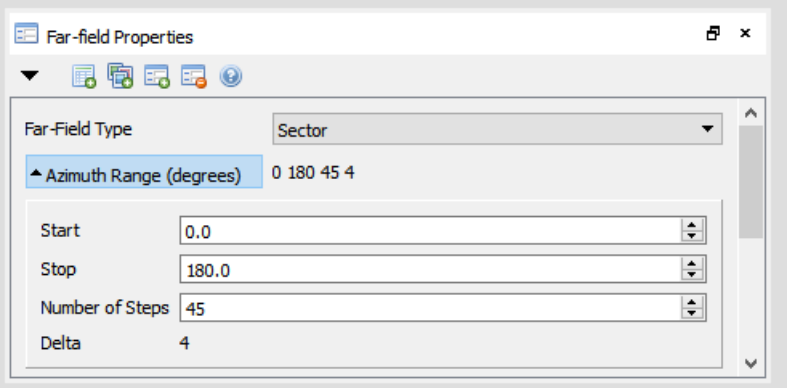


Рис. 3.23. Рассчитанный шаг между направлениями наблюдения по азимуту

Нажмите снова на ***Azimuth Range (degrees)***. Заметим, что теперь установки углов по азимуту: *0 180 45 4*.

3.4.8 Конфигурация меридиональных углов

Разверните папку ***Elevation Range (degrees)*** и введите ***Start***: -90, ***Stop***: 270, ***Number of steps***: 180. ***Delta*** автоматические станет равной 2.0.

Теперь мы видим полную сферу углов в виде точек в окне ***3D-Scene*** (рис. 3.24). Область дальнего поля выбрана в узле ***Windows: 3D-Scene: Far-Field***, который находится в нижней части дерева проекта.

Разверните панель ***Show Markers*** внутри указанного узла и установите слайдер ***Marker Size*** = 2.0

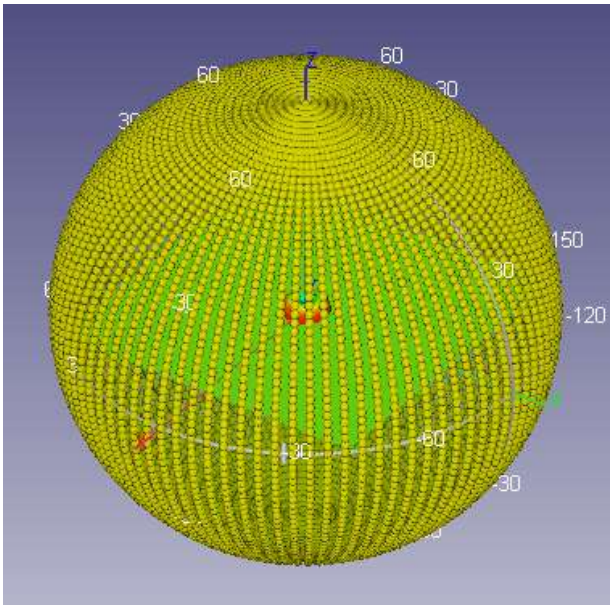


Рис. 3.24. Сфера, в точках которых рассчитываются характеристики дальнего поля

Поэкспериментируйте с различными другими вариантами выбора типа дальнего поля и настройками угла, чтобы увидеть, как они влияют на вырезы и сектора, отображаемые в трехмерном представлении. Попробуйте также экспериментировать с различными элементами маркеров, в папках ***Globe*** и ***Grid*** внутри узла ***Windows: 3D-Scene: Far-field***.

3.5 Установка метода расчета и частоты

Выберите узел **Analysis:Frequency** в дереве проекта. На панели свойств задайте ***Domain Type: Single***, ***Frequency (GHz)***: 10 [ГГц] (рис. 3.25).

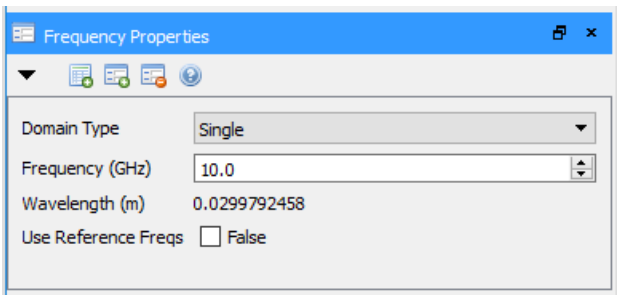


Рис. 3.25. Установка частоты

3.5.1 Конфигурирование метода расчета

Выберите узел **Analysis:Methodology** и задайте установки на его панели (рис. 3.26):

- ***Ray Density (per wavelength)***: 5.0 (плотность лучей)
- ***Max Number of Bounces***: 1 (максимальное число узлов)

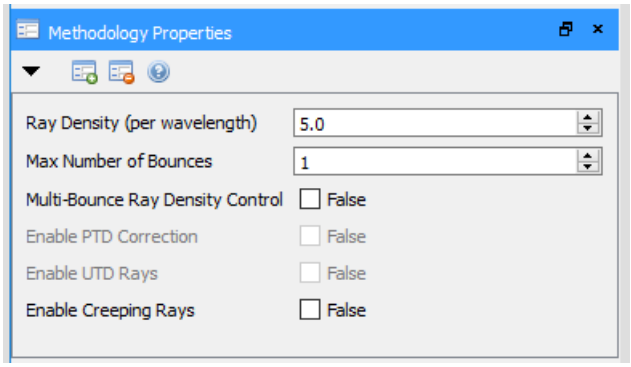


Рис. 3.26. Опции метода расчета

3.5.2 Конфигурирование установок вывода данных

Выберите узел **Analysis:Output**. В его панели свойств, установим опции, показанные на рис. 3.27.

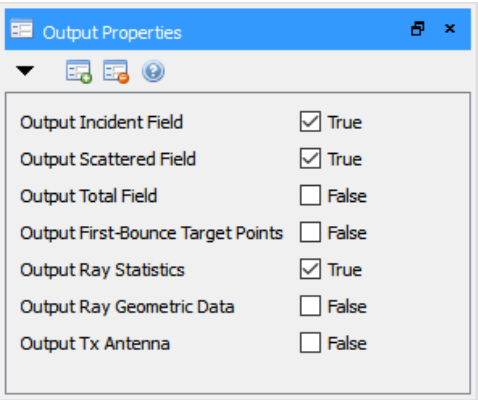


Рис. 3.27. Установка типов выводимых полей и лучей

3.6 Запуск моделирования и вывод результатов расчета

Кликните кнопку ***Run Analysis*** в главном меню. Процесс расчета займет несколько секунд. По завершении моделирования маркеры угла наблюдения в окне ***3D–Scene*** изменят цвет. Цвет связан с результирующим значением ДН. Кроме того, узел ***Far-Field*** появится под узлом ***Results*** в дереве проекта. Обратите внимание, что в узле ***Analysis: Far-Field*** углы наблюдения были настроены на шаге 3.4. Свойства визуализации результатов настраиваются в узле ***Windows: 3D - Scene: Far-Field***.

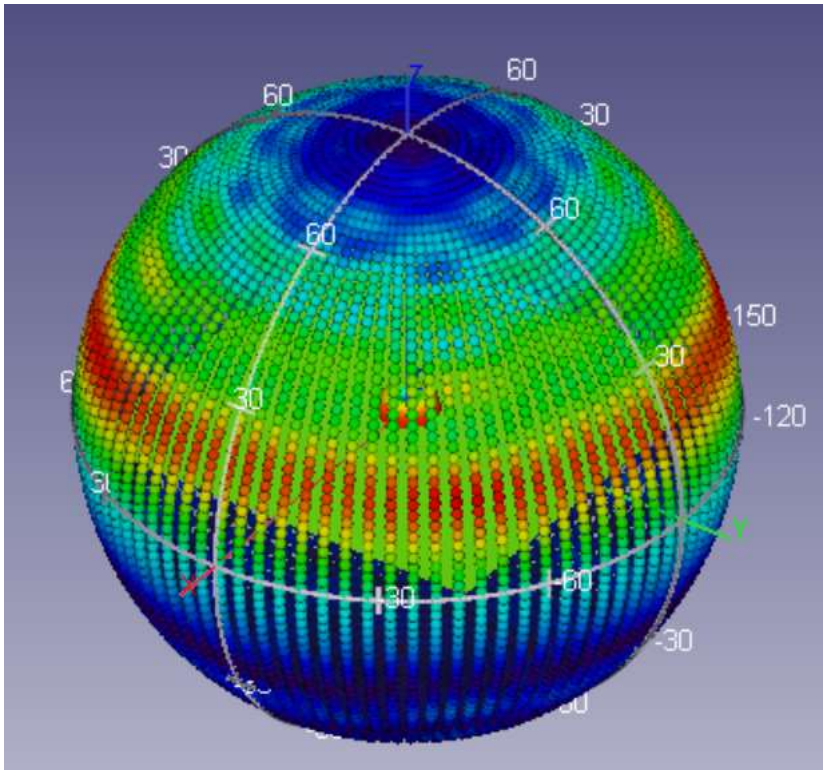


Рис. 3.28. Рассчитанная сфера с характеристиками дальнего поля в виде цвета

В этот момент результаты расчета еще не сохранились. Сохраните проект командой ***Save Project***. Результаты теперь сохранятся в папке проекта ***Tutorial1.savant***.

3.6.1 Показ результатов расчета

Savant обеспечивает несколько путей для вывода результатов расчета.

Выберите узел ***Windows: 3D-Scene: Far-Field.*** (рис. 3.29). Свойства показывают, что ***Color by Result*** переключено на режим включения (***True***).

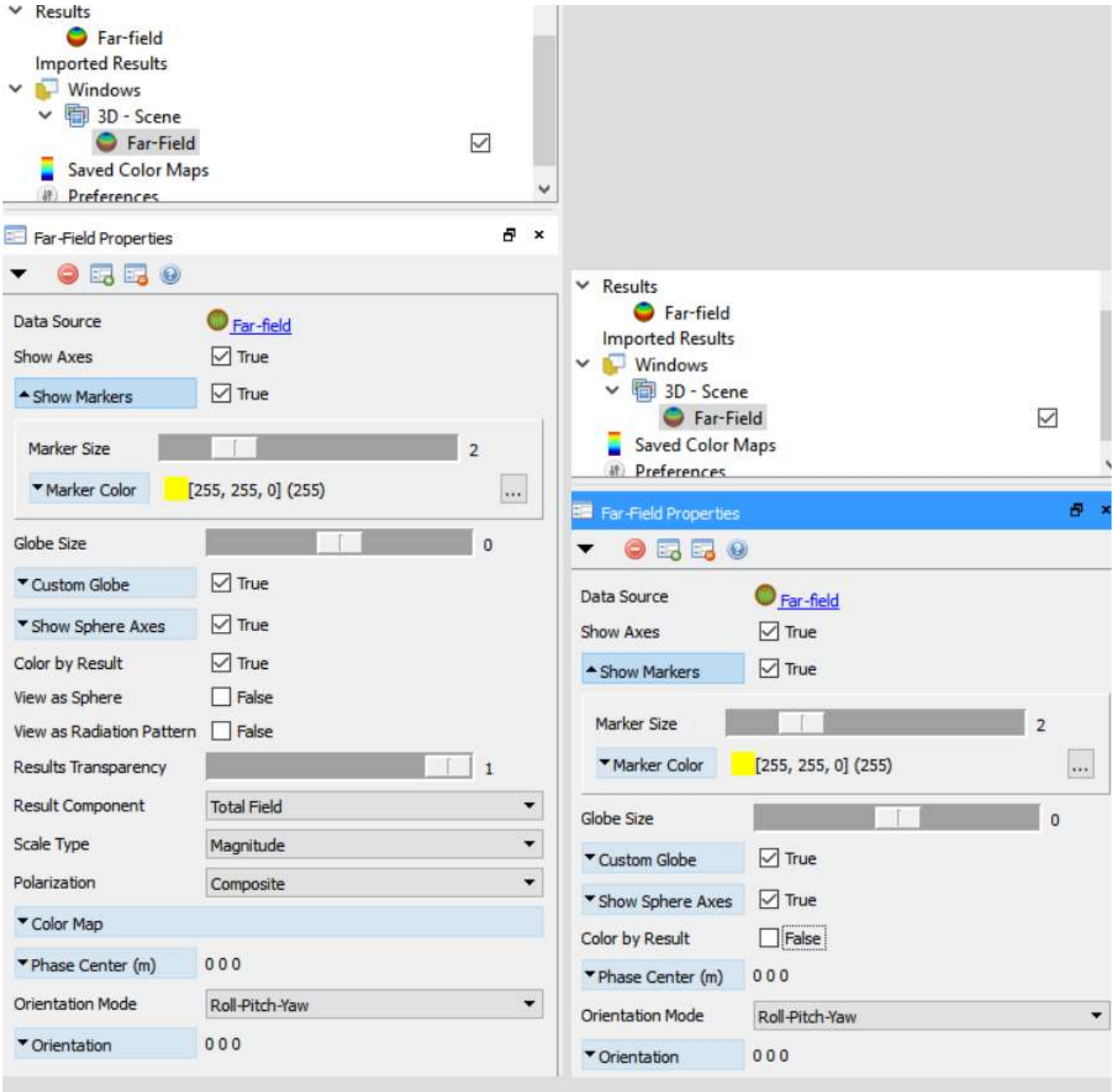


Рис. 3.29. Опции вывода ДН рассчитанной структуры

Отключите режим **Color by Result (False)**. Маркеры углов наблюдения дальнего поля возвращаются к одному цвету, как показано в конце шага 4 (стр. 83).

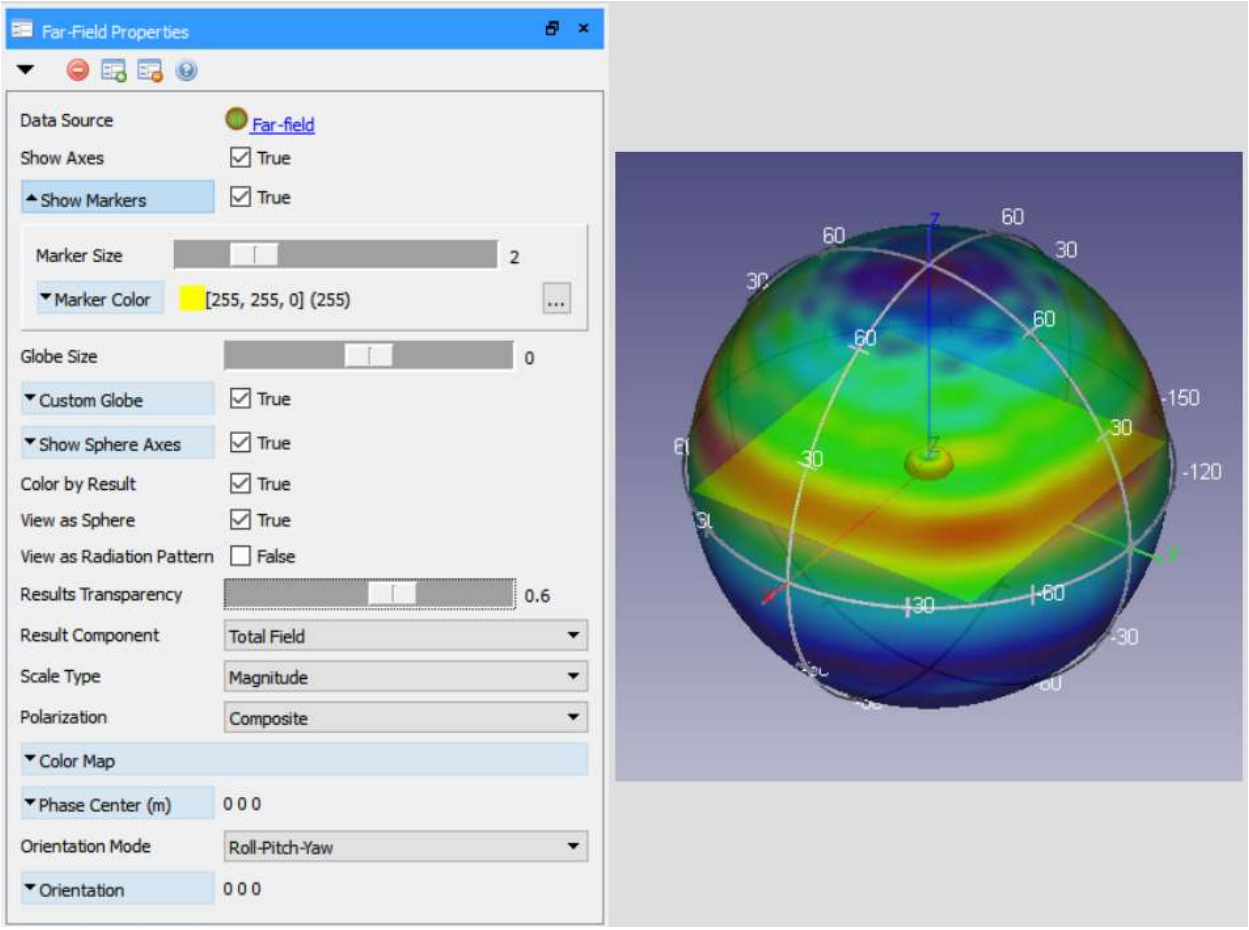


Рис. 3.30. Вывод цветового представления ДН структуры

Включите обратно опцию ***Color by Result***.

Включите ***View as Sphere***. ***Savant*** меняет цвет маркеров на сплошной цвет масштабах области. Однако плоскость и ДН диполя "пончик" теперь затенены.

Подстройте опцию ***Results Transparency*** (рис. 3.30) до величины 0.6. Плата и диполь теперь стали частично видны внутри цветной сферы. Сфера отображает уровни дальнего поля, а не поля на сфере с показанным радиусом. На самом деле, отображаемый радиус сферы может быть увеличен или уменьшен относительно размера остальной части сцены, регулируя настройку ***Globe Size*** в папке панели узла ***Windows: 3D-Scene: Far-Field***. Глобус дальнего поля не имеет абсолютного масштаба (теоретически его радиус бесконечен), поэтому его радиус не имеет физического смысла.

Установите прозрачность ***Transparency*** равной 1 (1, ***totally opaque***) и характеристику ***Result Component*** на ***Incident Field***. Цветная сфера становится гораздо более равномерным, соответствующий входной диаграмме направленности ***short_dipole***. В ***Savant***, падающее поле относится к полю, которое излучает свободностоящая антенна ***Tx*** при отсутствии модели ***CAD*** платформы.

Установите ***Result Component*** как ***Scattered Field***. Рассеянное поле - это поле, создаваемое токами на пластине. Оно симметрично по высоте вследствие симметрии геометрии квадратной пластины (рис. 3.31).

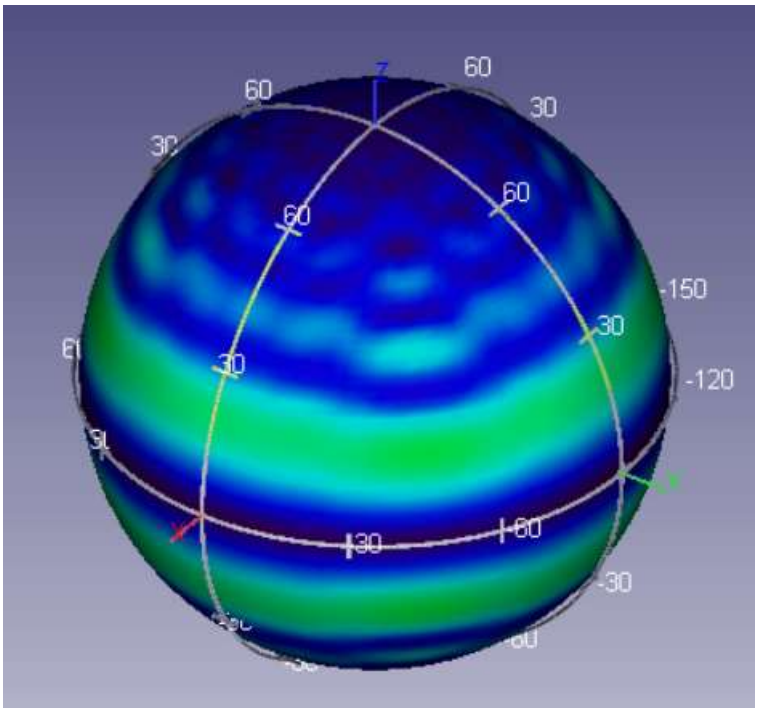


Рис. 3.31. Вид поля рассеяния

Выберем ***Result Component*** обратно как ***Total Field***. Это есть когерентная сумма ***Incident Field*** и ***Scattered Field***, и соответствующее поле производится антенной ***Tx*** в присутствии платформы ***CAD*** модели (т.е. квадратной плоскости).

Напомним из шага 5, что мы не выбираем ***Total Field*** в качестве выходных данных. Причина, по которой ***Savant*** может предоставить этот результат в любом случае, заключается в том, что мы выбрали как падающие, так и рассеянные поля в качестве выходных данных. При отображении результатов в графическом интерфейсе, ***Savant*** сразу восстановит общее поле из этих двух фундаментальных компонентов.

Единственная причина для включения ***Total Field*** заключается в том, что необходимо экспортировать общие данные поля для последующей обработки. Эти результаты записываются в файл **Far-field.savant_out/ FF_total.dlxcd** в каталоге проекта. Результаты падающего и рассеянного поля регистрируются вместе в файле ***Far-field.savant_out/FF.dlxcd***. Кроме отображения результатов, ***Savant*** не предоставляет прямого доступа к этим файлам для отображения или копирования текста. Если они необходимы для

последующей обработки, обратитесь к ним напрямую с помощью файловой системы компьютера.

3.6.2 Показ и подстройка цветового масштаба данных поля

В панели узла свойств ***Windows: 3D - Scene: Far-Field***, переключите опцию ***Scale Type*** от ***Magnitude*** к ***Decibel*** (рис. 3.32). Цветовая ДН сферы изменилась. Исходно, линейное поле ***Magnitude*** было нанесено для показа цветового диапазона. Теперь уровни поля в масштабе **Decibel (dB)** наносятся для того же самого цветового диапазона.

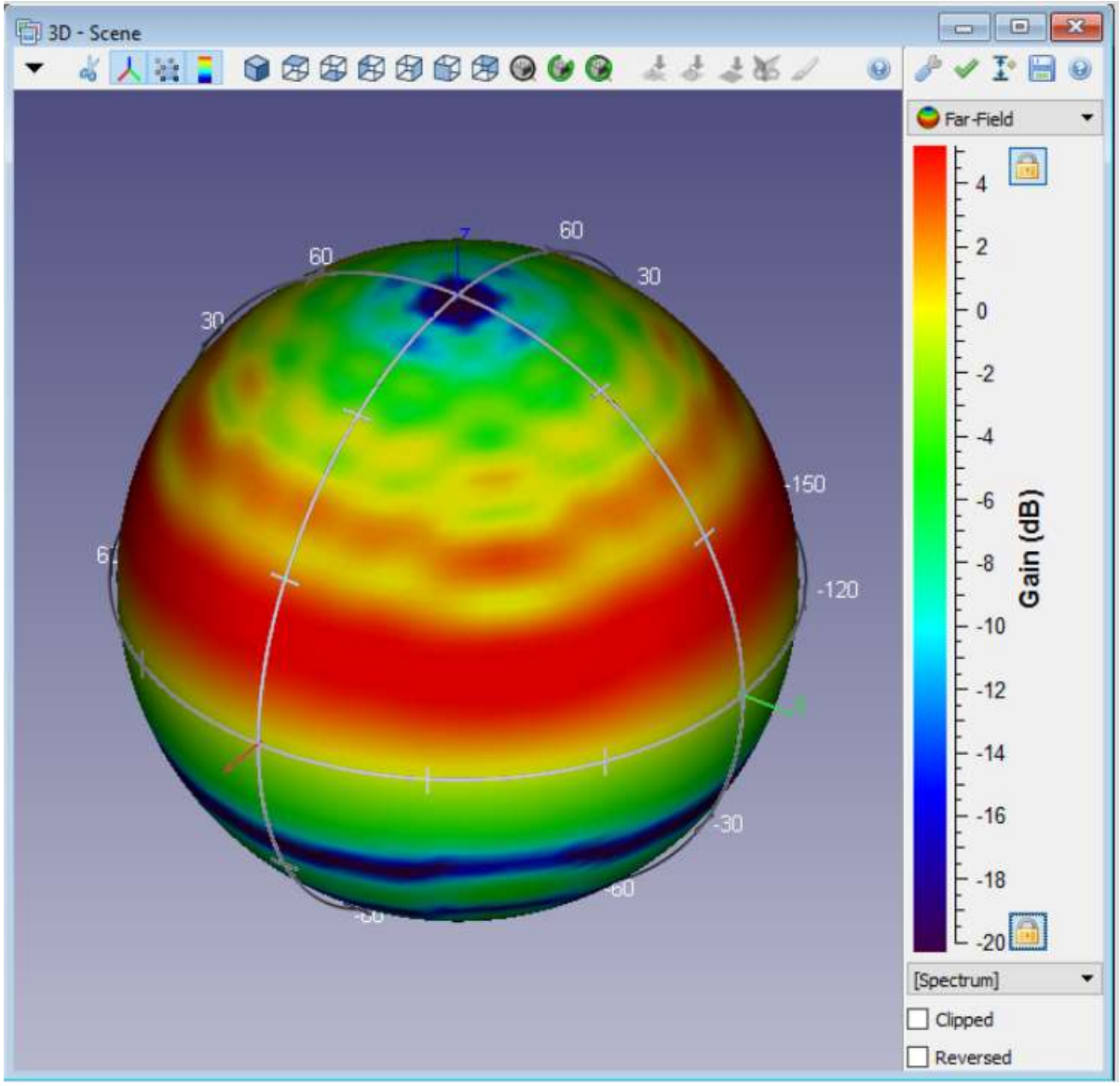


Рис. 3.32. Масштабирование усиления антенной структуры

Нажмите на кнопку ***Color-bar*** на панели инструментов, расположенной в верхней части окна ***3D-Scene***. На правой стороне появляется цветовая полоска, указывающая на цветовую шкалу (рис. 3.32). Тем не менее, в

настоящее время он не может быть установлен для представления цветовой шкалы для отображаемых результатов. ***Savant*** может поддерживать одновременно несколько цветовых гамм в 3-D окне для различных объектов, которые требуют цветового масштабирования, но он может показывать только один цвет по очереди. Это зависит от узла, выбранного в селекторе непосредственно над цветовым баром.

Выберите ***Far-Field*** из выплывающего селектора выше цветового бара. Цветовой бар теперь показывает результаты в цветовой шкале в ***dB***. Выбор ***Far-Field*** сверху бара к узлу ***Windows: 3D - Scene: Far-Field*** переключает управление 3-D дисплеем к узлу ***Results: Far-Field*** который содержит результаты текущего моделирования.

Цветовая шкала может быть подстроена подстройкой цветового регулятора вверх или вниз левой кнопкой мыши.

Position курсора мыши над цветовым баром. Курсор изменяет свой вид от стрелки к изображению руки над цветовым баром.

Нажмите левую кнопку мыши и перетащите максимум от +10 dB примерно на +5 ***dB***. Отображаемые поля обновляются по мере перетаскивания цветовой полосы. Зафиксируйте максимальное значение цветовой шкалы, нажав переключатель блокировки, расположенный в верхней части панели цветов

Перетаскивание в цветовой строке больше не изменит Максимальный уровень цветовой шкалы, хотя минимальный уровень остается свободным для изменения.

Перетащите минимум от -55 дБ до -20 дБ и заблокируйте его, нажав переключатель блокировки ***lock toggle*** рядом с **bottom** частью цветовой панели.

Минимальная и максимальная цветовая линейка не ограничиваются текущими внешними диапазоном цветовой линейки:

Разблокируйте (***Unlock***) блокировку цветовой линейки и перетащите максимум подставленный ранее на +10 ***dB*** и установите его на +20 ***dB.***

Чем дальше вы перетаскиваете максимум от верхней части цветового бара, тем быстрее его масштаб расширяется в верхней части.

Кликните кнопку ***Default Scale*** в инструментальной линейке выше цветового бара, чтобы вернуться к исходной конфигурации размера

Степени цветного бар возвращаются к исходному диапазону цветов. В узле свойств ***Windows: 3D-Scene: Far-Field*** установите ***Scale Type*** на **P*ower***.

Т-метка шкалы цветовой шкалы изменяется от **Gain (dB)** до усиления **Gain** в ед. Его числовой диапазон соответственно обновляется до нового типа шкалы.

До сих пор мы всегда отображали поля в поляризации ***Composite***, т. е. среднеквадратичное сочетание ЭМ поля с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Попробуйте другие варианты настройки поля "**Polarization**" и наблюдайте за эффектом. Кроме того, обратите внимание, что другие варианты поляризации предлагают дополнительные опции для селектора **Scale Type: Phase, Real**, и **Imaginary**. Эта информация теряется, когда поляризация установлена в ***Composite***.

Занесите ***Scale Type*** как ***Decibel*** и ***Polarization*** как ***Composite***.
В той же самой панели, включите ***View as Radiation Pattern***. Теперь результаты показаны как объемная 3-D ДН антенны (рис. 3.33).

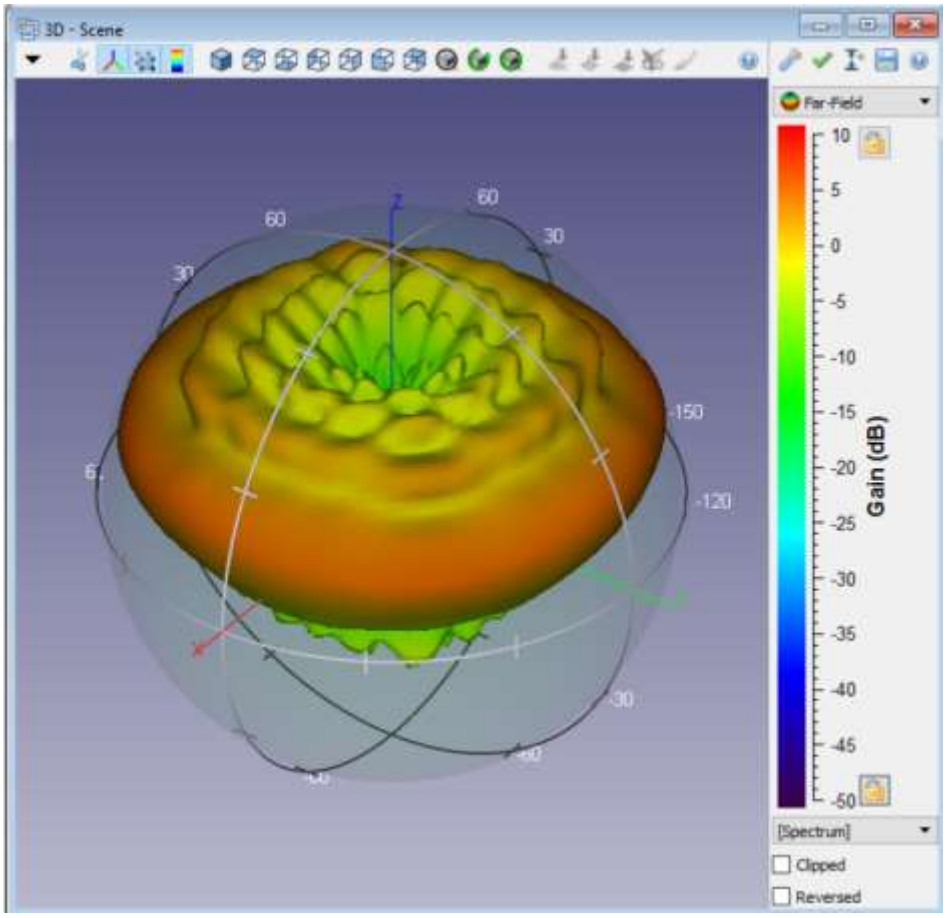
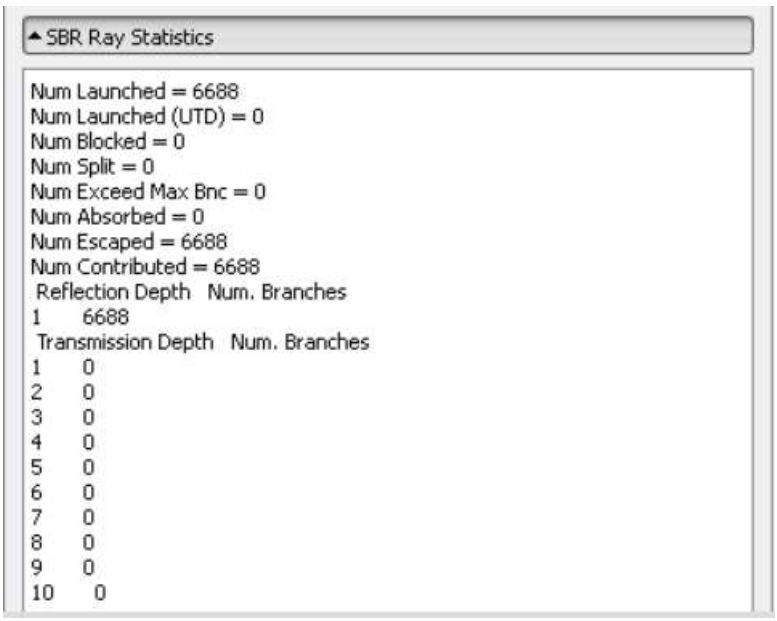


Рис. 3.33. Трехмерная диаграмма направленности ДН дальнего поля

В панели свойств ***Results: Far-Field***, разверните папку панели ***SBR Ray Statistics.***



SBR Ray Statistics

Num Launched = 6688
Num Launched (UTD) = 0
Num Blocked = 0
Num Split = 0
Num Exceed Max Bnc = 0
Num Absorbed = 0
Num Escaped = 6688
Num Contributed = 6688

Reflection Depth	Num. Branches
1	6688

Transmission Depth	Num. Branches
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

Рис. 3.34. Таблица статистики лучей

Из таблицы рис. 3.34 видно, что в ходе моделирования было прослежено и обработано 6688 лучей. Эта панель отражает данные, которые можно найти в файле ***raystat*** внутри папки проекта.

4 ИСТОЧНИКИ ТОКА. НАНЕСЕНИЕ НА ГРАФИК И ИМПОРТ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя выполненный в разделе 3 проект (Пример 1), представим проводную антенну в виде распределенного тока. Результаты пересчитываются и выводятся на 2-D график, а затем сравниваются с первоначальным результатом, полученным в Примере 1.

В программе ***Savant*** представление ввода антенны с помощью распределения тока всегда более точное, чем его представление соответствующее картине ДН дальнего поля (как это было сделано в разделе 3), поскольку распределение тока может влиять и на ближние и на дальние поля, включая поля высших порядков.

Цель работы

- Конфигурация антенны как источники тока.
- Нанесение результатов расчета на декартовую и полярную систему координат.
- Импорт результатов из других проектов для сравнения на одном графике.

Шаги этого примера 2:

1. Загрузка проекта примера 1 (из раздела 3) и сохранение его как нового проекта.
2. Загрузка и проверка распределения тока для монопольной проволочной антенны.

   Метод 1: Загрузка распределения тока из файла.

   Метод 2: Использование встроенной в ***Savant*** проволочной монопольной антенны.
3. Перезапуск моделирования и вывод результатов на график.
4. Импорт результатов из примера 1 и сравнение их с вновь полученными результатами (рис. 4.1).
5. Создание характеристик в зависимости от переменных для многомерных данных.
6. Создание графика в полярной системе координат.

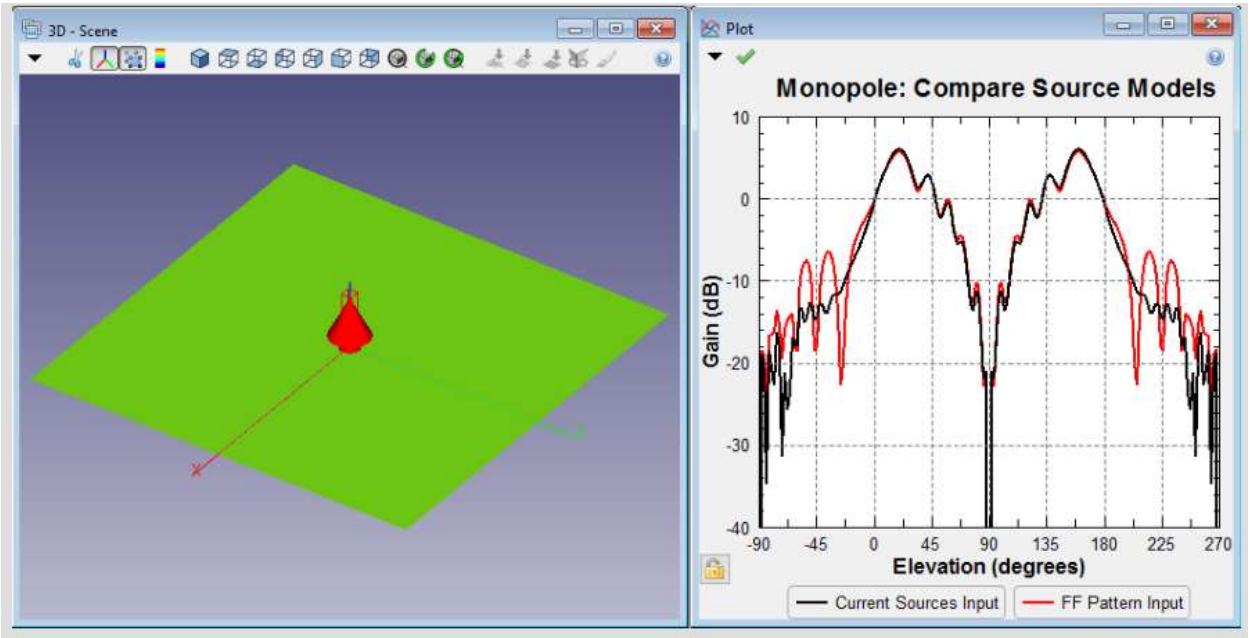


Рис. 4.1. Анализируемая структура монопольной антенны над земляной поверхностью и ДН: импортируемая ДН и рассчитанная по источникам тока.

4.1 Загрузка выполненного примера 1

Откройте завершенный проект **Tutorial1.savant**. Сохраните как новый проект **Tutorial2.savant**

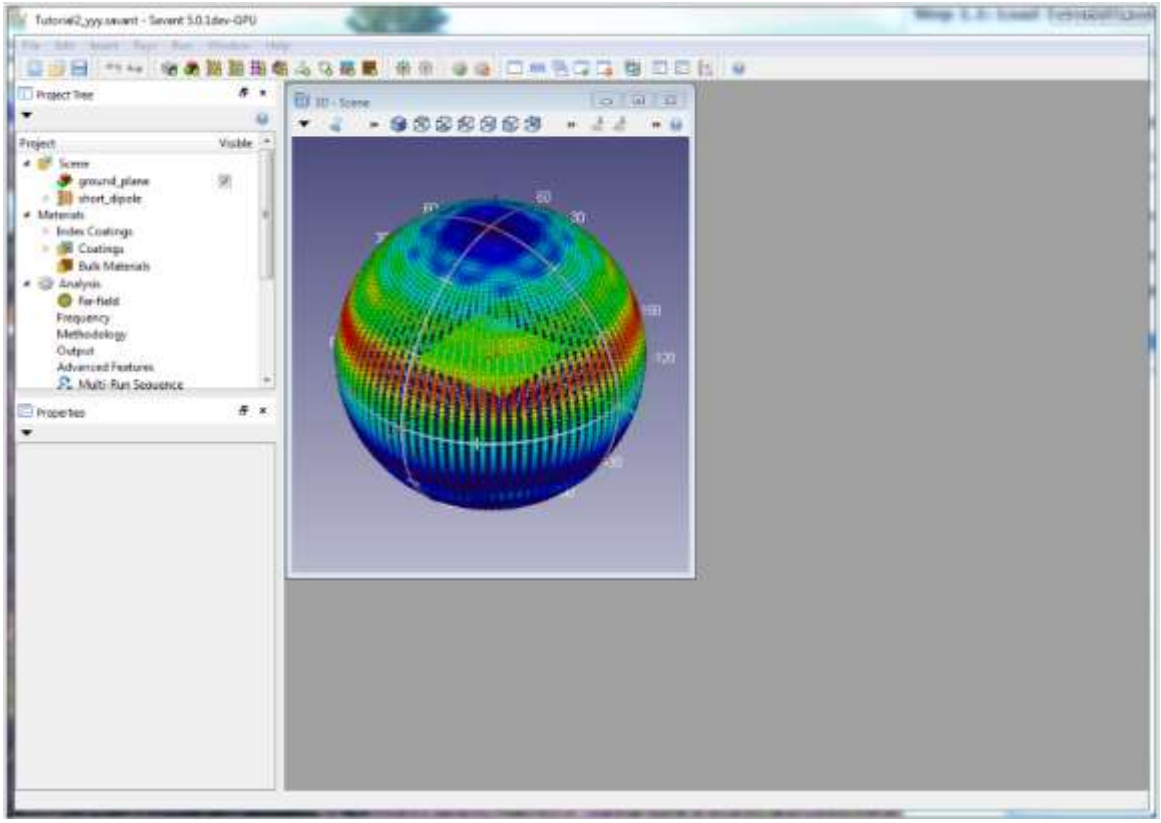


Рис. 4.2. Загрузка и переименование 1-го проекта

4.2 Распределение тока в монопольной проволочной антенне

Существует два метода, с помощью которых можно добавить проводную монопольную модель с источниками тока. Во-первых, загрузить источники тока из файла, во-вторых, использовать встроенный монополь «***wire monopole***». Здесь мы выполним оба метода.

Кликните кнопку ***Add Antenna from File...*** и в директории ***Tutorial2*** выберите файл ***qwmpole_10ghz.csrc***. В дереве проекта, он будет находиться под узлом ***Scene,*** как узел антенны с именем ***qwmpole_10ghz***. Выберите этот узел. Его имя означает четвертьволновую монопольную антенну на 10 ГГц.

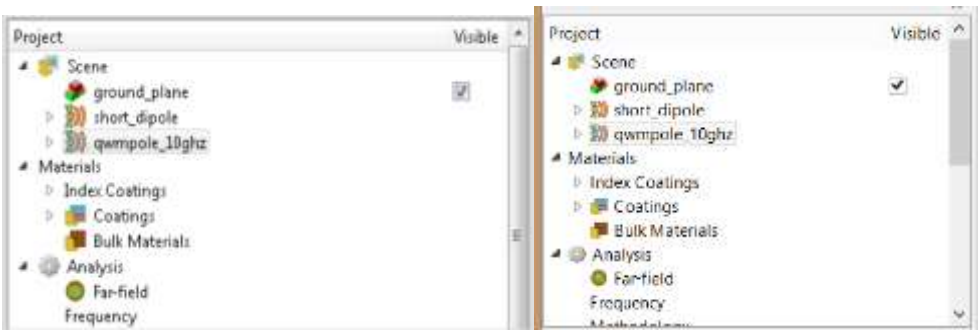


Рис. 4.3. Добавление антенны из файла в проект

В панели свойств для ***qwmpole_10ghz***, разверните папку панели ***Antenna Information***. В этой панели говорится, что загруженная антенна определена на одной частоте (10 GHz) и состоит из двух электрических источников (электрически коротких диполей).

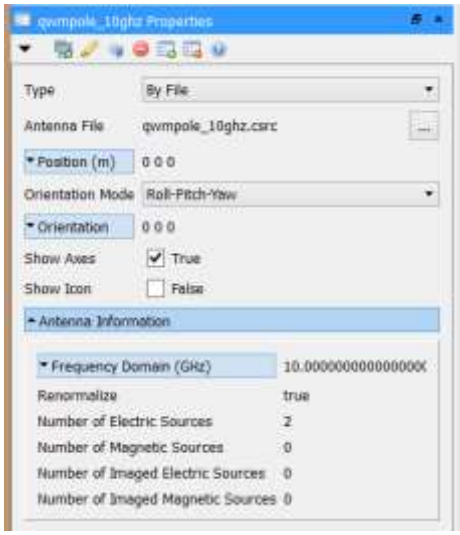


Рис. 4.4. Параметры диполя из файла

Два тока расположены вдоль оси монопольного провода. Они были созданы путем обработки рассчитанной плотности тока из программы ЭМ моделирования методом моментов, который использовался для моделирования тонкого провода длиной 0,75 см, присоединенного к бесконечной земляной плоскости, что соответствует λ/4 для частоты 10 ГГц.

Рассмотрение файла ASCII ***qwmpole_10ghz*** показывает, что источники тока находятся между координатами Z = λ/16 = 0.1875 см и Z = 3λ/16 = 0.5625 см. Это соответствует разделению провода на два сегмента, интеграции тока по каждому сегменту и присвоению их в качестве моментов тока в центре каждого сегмента. Источники тока должны быть частями антенны при плотности не менее λ/4, и в этом случае плотность выборки вдвое превышает необходимый минимум.

Переименуем эту четвертьволновую монопольную антенну на ***current_sources***.

Дважды кликните на узел ***current_sources***. *П*оявляется окно, и два источника тока можно видеть как сплошные стрелки. Источник тока вблизи основания (при z = 0) сильнее, чем источник рядом с наконечником.

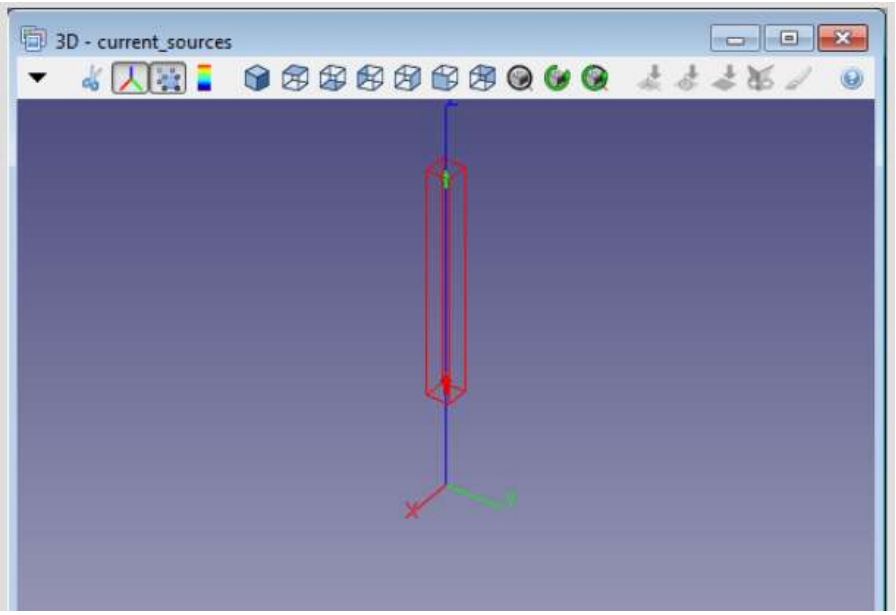


Рис. 4.5. Источник тока, представленный из двух сегментов

Закройте 3-D окно для ***current_sources***. В главном окне ***3D-Scene*** источники тока не могут быть видны, потому что они затемняются цветовым шаром дальнего поля и рисунком ДН антенны ***short_dipole*** из примера 1. Отключите показ шара ***Far-Field***, снимая опцию ***Visible*** в узле ***Windows*: *3D-Scene*: *Far-Field***.

Выберите узел ***short_dipole*** в дереве и отключите ***Show Axes***. Раскройте узел и снимите опцию ***Visible*** для этой дочернего узла ***Pattern***. Теперь эта антенна становится невидимой.

Выберите узел ***current_sources***. Ограничивающий его бокс будет виден в окне ***3D-Scene*** (рис. 4.5).

Выполните увеличение в глобальной системе координат, пока не будут видны стрелки источников тока в окне ***3D-Scene*** и их ограничивающий бокс. Это можно сделать, вращая колесико мышки, или нажимая на активную кнопку ***Zoom to Node***.

Разверните узел ***current_sources*** и выберите его подузел ***Current Sources.*** Установите слайдер ***Length*** приблизительно на величину 0.3.

Можно видеть, что поведение масштабирования выводимых источников тока резко меняется в этот момент. Нарисованная шкала стрелок источника тока не влияет на их силу излучения. Поэкспериментируйте с другими параметрами (рис. 4.6) отображения источников тока в этом узле.

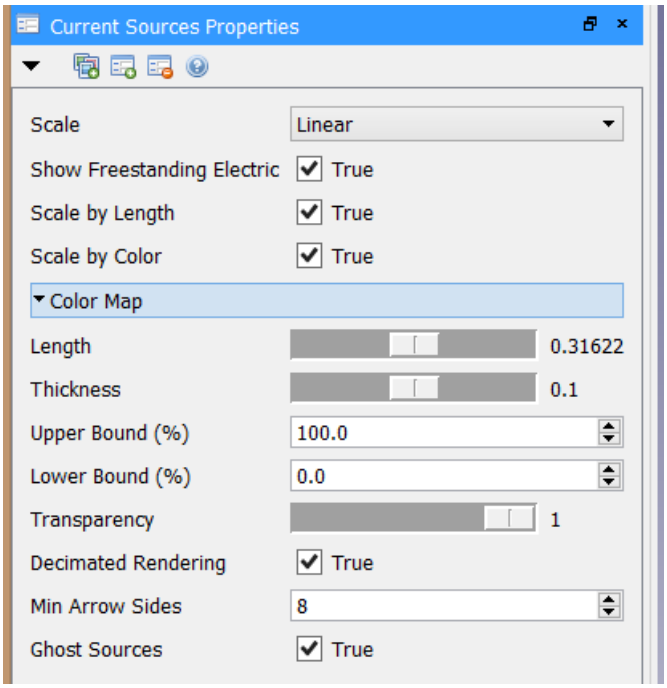


Рис. 4.6. Окно свойств источников тока

Уменьшите окно ***3D–Scene***. *Т*еперь вы можете увидеть источники тока вместе с пластиной. Когда видна вся пластина, источники остаются очень маленькими, потому что пластины (0,3 м по стороне) гораздо больше, чем размер источников в вертикальном направлении (0.0075 м), представляющих четвертьволновый монополь (рис. 4.7).

Подстройте длину источников тока до величины около Length=2.5 (рис. 4.6). Теперь красная стрелка большого источника тока ясно видна

относительно плоскости. Однако при таком масштабировании стрелки скрывается слабый источник тока. Регулировка длины шкалы источников тока не меняет их абсолютных положений, которые заданы в файле источника тока.

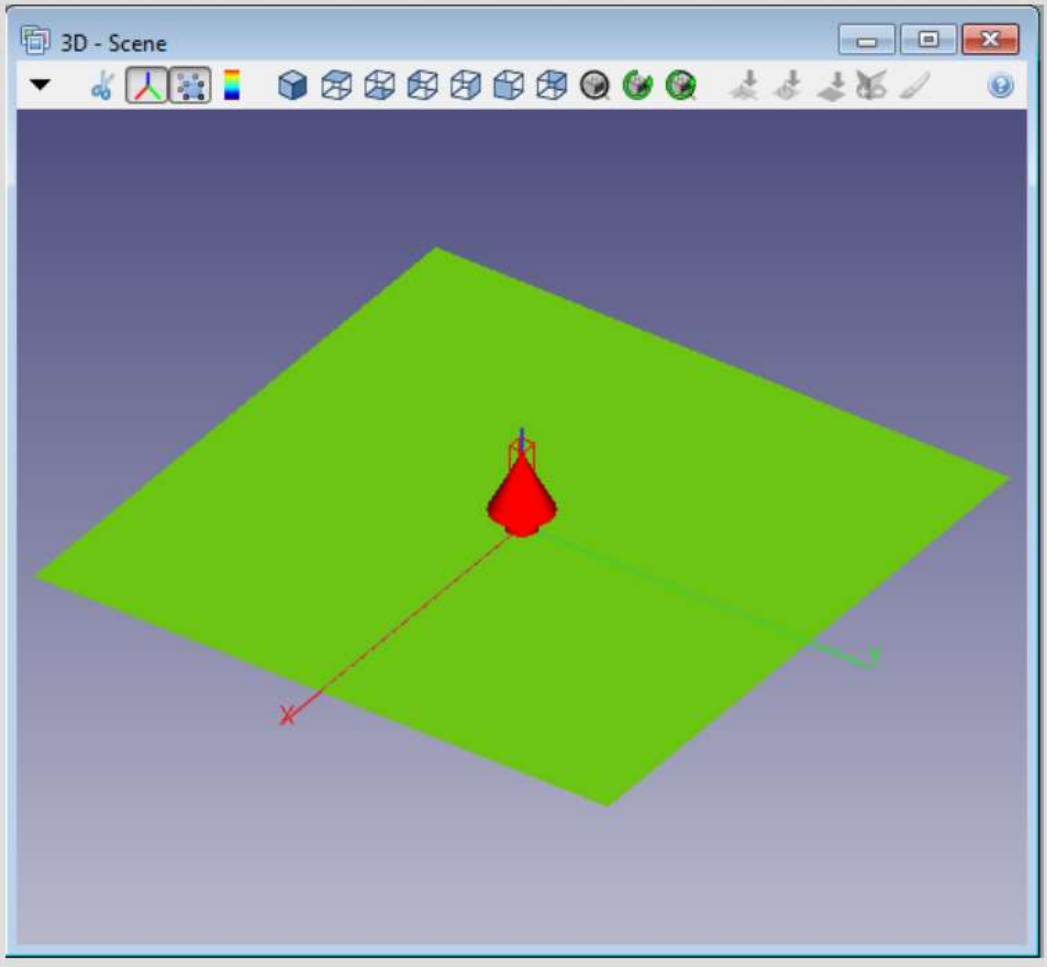


Рис. 4.7. Увеличение видимой длины источника тока до 2.5 м

Выберите теперь опцию ***Visible*** для узла внизу ***current_sources: Pattern***. Диаграмма напрвленности антенны теперь видна в виде красного яблока диполя с центром на красной стрелке источника тока. Это не ДН ***short_dipole*** из Примера 1, которая все еще невидима, а это ДН, построенная программой в соответствии с распределением и возбуждением источников тока ***current_sources***. Это альтернативный способ просмотра антенн на основе источников тока в сцене.

Отключите видимость узла ***current_sources: Pattern***, чтобы он стал невидимым.

4.3 Добавление и конфигурирование встроенной монопольной антенны

Кликните кнопку ***Add Antenna*** в главном окне меню. В дереве проекта будет показан новый узел под узлом ***Scene*** как узел антенны под именем ***Antenna 1***.

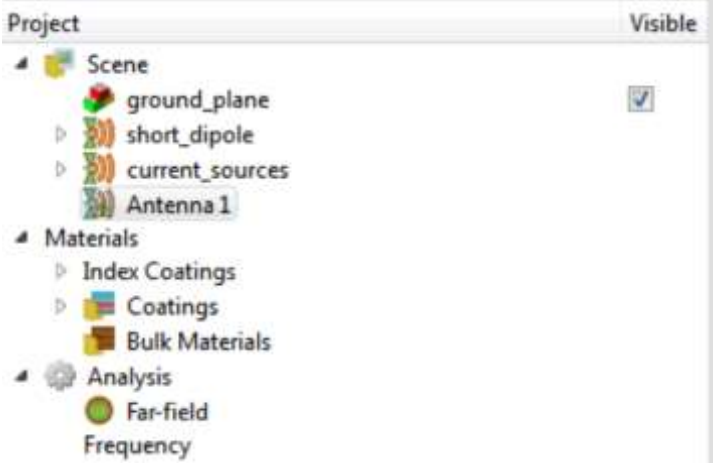


Рис. 4.8. Добавление антенны в сцену

Выберите узел ***Scene*: *Antenna*** *1* в дереве проекта. В панели свойств для ***Antenna 1***, кликните выплывающее меню ***Type*** и выберите ***Wire Monopole*** (рис. 4.9). Введите значение резонансной частоты ***Resonant Frequency*** = *10GHz*. Кликните выплывающее меню ***Antenna Representation*** и выберите ***Current Sources***.

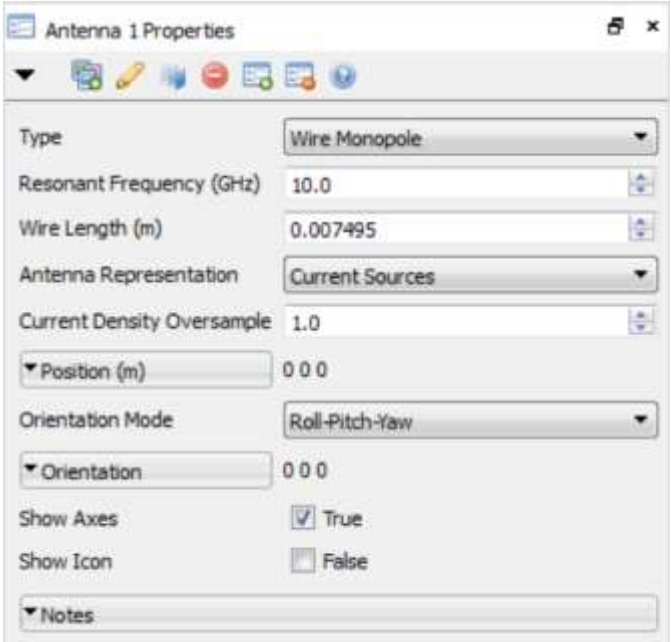


Рис. 4.9. Добавление проволочной монопольной антенны

Переименуйте встроенную четвертьволновую монопольную антенну как **current_sources_builtin**.

4.4 Проверка встроенной монопольной антенны

Дважды кликните на узел ***current_sources_builtin***. Появляется окно визуализации для узла ***current_sources_builtin*** (рис. 4.10).

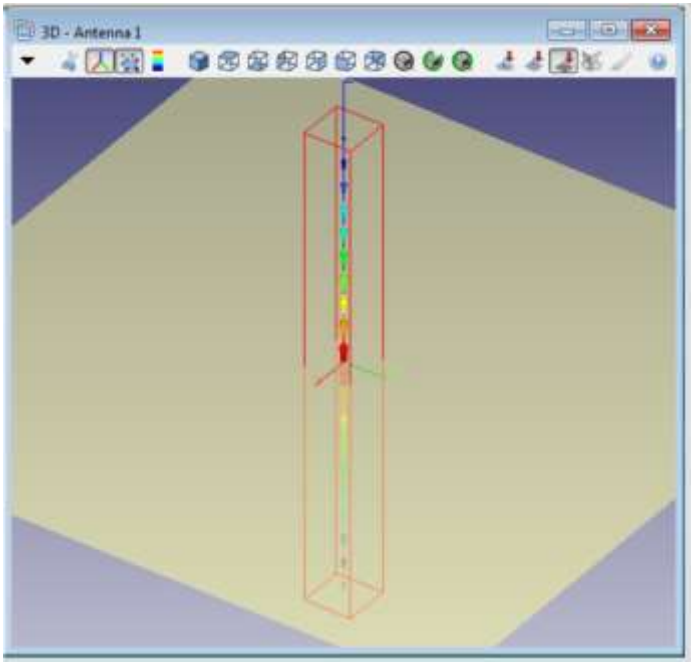


Рис. 4.10. Представление антенны в виде линии тока

Разверните узел ***current_sources_builtin*** и выберите его подузел ***Current Sources.***

Подстройте слайдер ***Thickness*** (рис. 4.6) на 0.4. Теперь каждый источник тока можно увидеть. Эти источники тока отличаются от источников в узле ***current_sources***. Показывается плоскость, и 10 источников, видимых над плоскостью и ниже.

Встроенная в ***Savant*** проводная ***Wire Monopole*** антенна является одной из нескольких различных типов антенн, которые поддерживают включение её в земляную плоскость ***ground planes***. Пластина представляет земляную плоскость, а источники под плоскостью земли являются источниками. Оба сделаны слегка прозрачными, чтобы подчеркнуть, что они физически не присутствуют в сцене. Источники показывает эквивалентное представление поля при наличии заземления (рис. 4.11).

Для встроенных антенн, представленных источниками тока, количество отображаемых источников тока зависит от резонансной частоты и настроек плотности тока ***Resonant Frequency*** и ***Current Density Oversample*** на панели свойств антенного узла. Антенный узел не требует знания частоты моделирования, поэтому для отображения количества источников тока используется коэффициент, в 10 раз превышающий ***Resonant Frequency***.

Во время моделирования, источники тока создаются внутренне на основе самой высокой частоты в частотном узле. Далее в этом примере рассмотрим источники тока, используемые для моделирования.

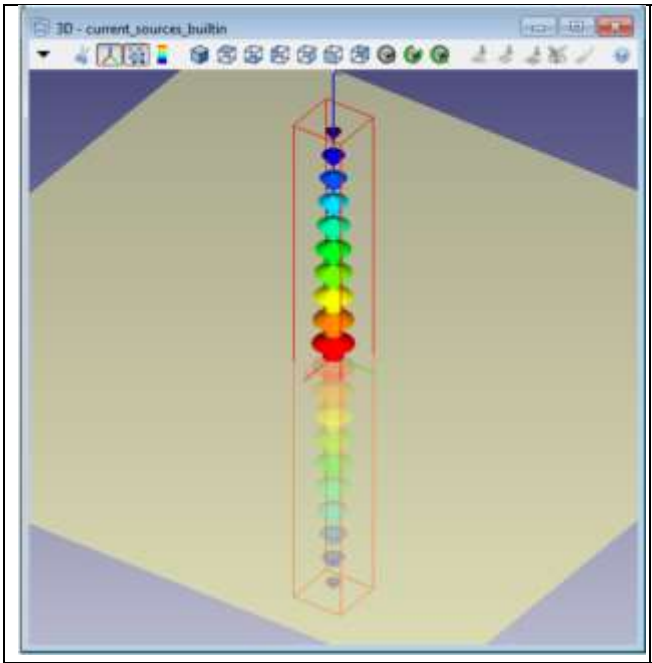


Рис. 4.11. Источники тока

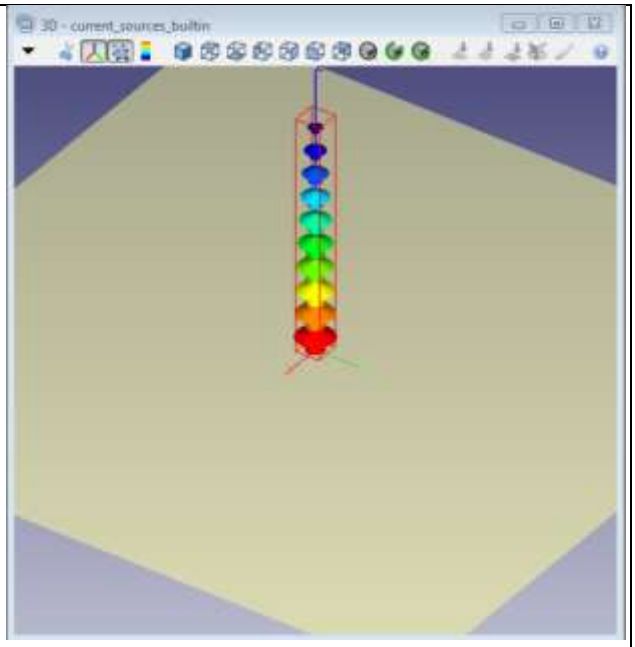


Рис. 4.12. Сегменты источника тока сверху земляной платы

В панели свойств для **current_sources_builtin: Current Sources**, отключите ***Ghost Sources***. Появляется мнимые источники (появившиеся как ***Ghost Sources***) внизу земляной плоскости.

Разверните узел ***Ground Planes: Ground Plane 1*** и отключите её видимость в дереве проекта. Земляная плата становится невидимой (рис. 4.12).

Включите видимость узла ***Ground Plane 1***. Отключите видимость узла ***Current Sources*** и включите видимость узла ***Pattern***. Кликните кнопку ***Front View*** из окна визуализации ***current_sources_builtin***.

Видимая ДН источника тока не займет большую часть окна. Вращайте вид немного, так чтобы была видна земляная плата:

Сдвиньте точку мыши к окну ***3D-current_sources_builtin*** командой ***Move***. Удерживая левую кнопку мыши, передвиньте мышь вверх на

небольшое расстояние. В окне показывается ДН, которая вырезана снизу земляной плоскости (рис. 4.13).

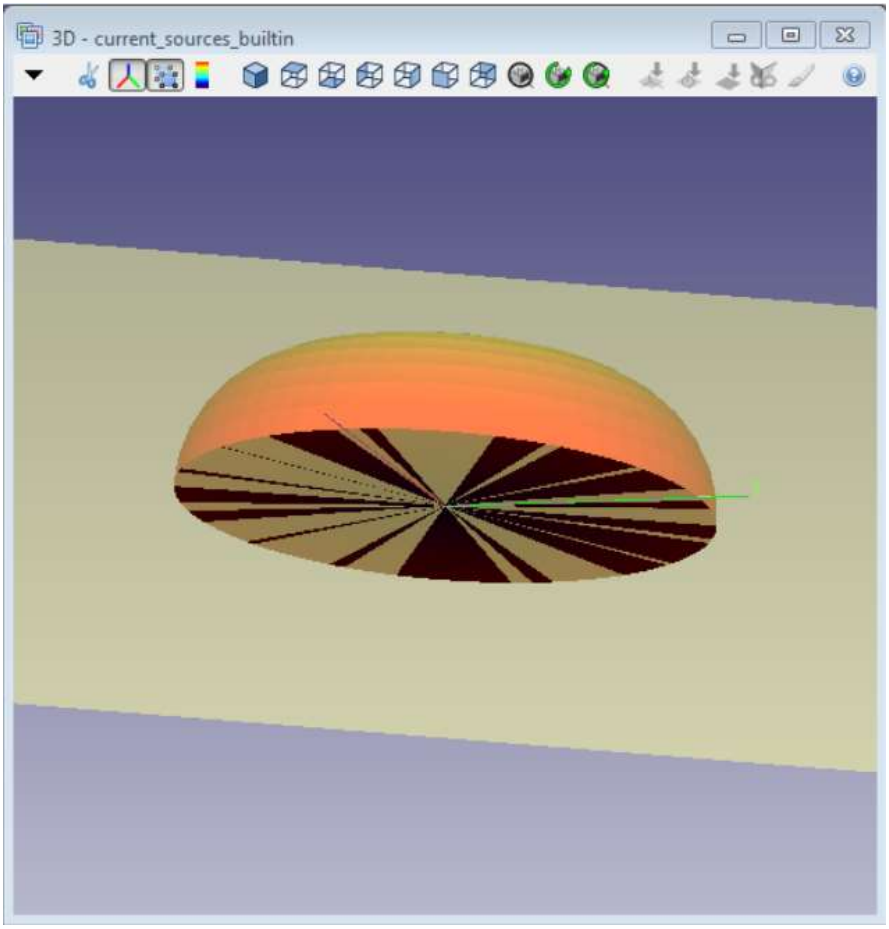


Рис. 4.13. Верхняя часть диаграммы направленности

Выберите узел **current_sources_builtin: Ground Planes: Ground Plane 1**, и отключите ***Active***. *Т*еперь появится ДН под земляной плоскостью (рис. 4.14).

Отображение виртуальных источников тока и ДН только в верхнем полушарии показывает, что эта антенна не излучает в нижнюю полусферу, если имеется земляная плоскость. В ***Savant***, комбинация падающего и рассеянного поля производит обнуление поля в нижнем полупространстве от земляной платы. Это причина, по которой ДН появляется в виде полного яблока, а источники тока отображаются только над плоскостью земли, когда плоскость земли не активна. Если отключить опцию ***Active***, то ДН появляется снизу земляной плоскости (рис. 4.14).

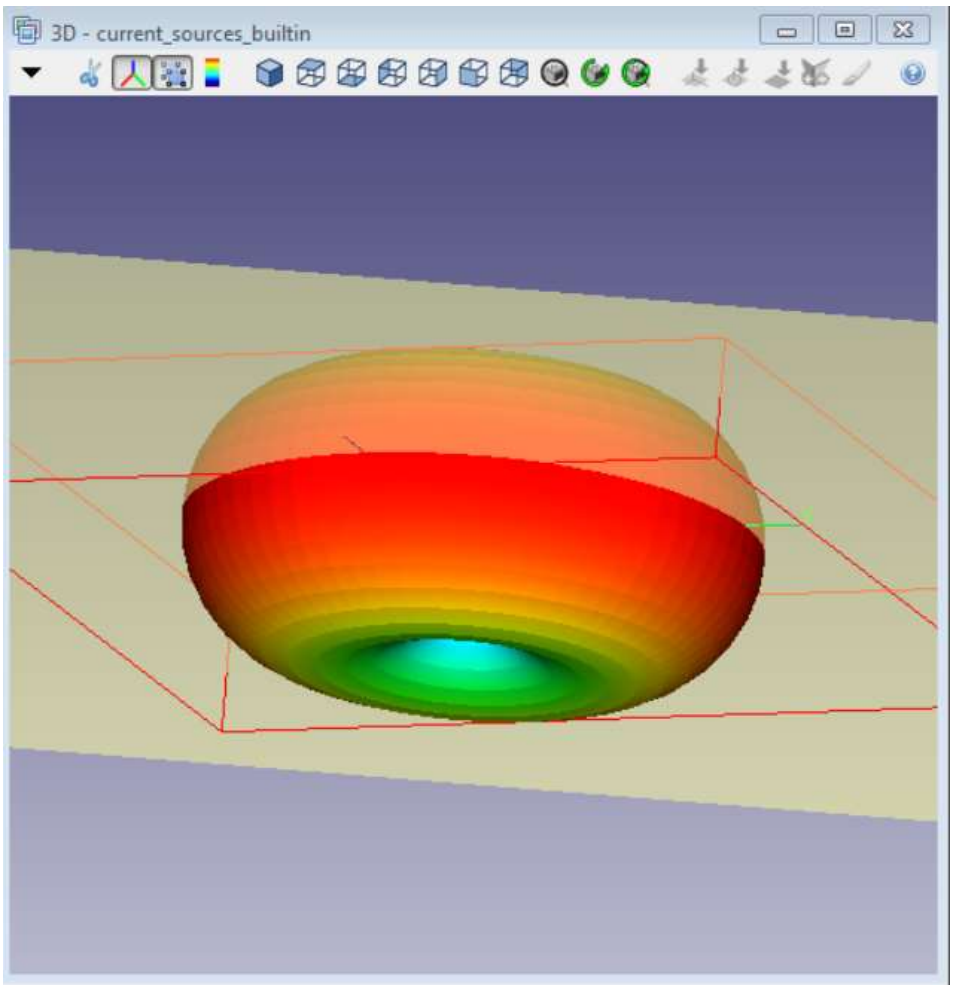


Рис. 4.14. Вид диаграммы направленности монопольной антенны на плоскости

Выберите узел ***Ground Plane 1***, и включите опцию ***Active.***

Закройте окно ***3-D window*** для ***current_sources_builtin***. Выберите узел источников тока ***current_sources*** в дереве проекта и отключите ***Show Axes***.

Разверните узел и снимите опцию ***Visible*** для дочернего узла ***Current Sources***. Теперь антенна невидима.

Раскройте узел ***current_sources_builtin***, отключите ***Visibility*** для узла ***Pattern***, и включите ***Visibility*** для узла ***Current Sources***. Выберите узел ***Current Sources***.

Увеличьте глобальную систему координат в окне ***3D-Scene*** пока видимы и стрелки источников тока, и бокс окружения и земляная плата (рис. 4.15).

Земляная плоскость, связанная с узлом ***Current Sources*** показывается, перекрывая ***ground_plane***, и служит для того, чтобы напомнить, что ***current_sources_builtin*** имеет земляную плоскость.

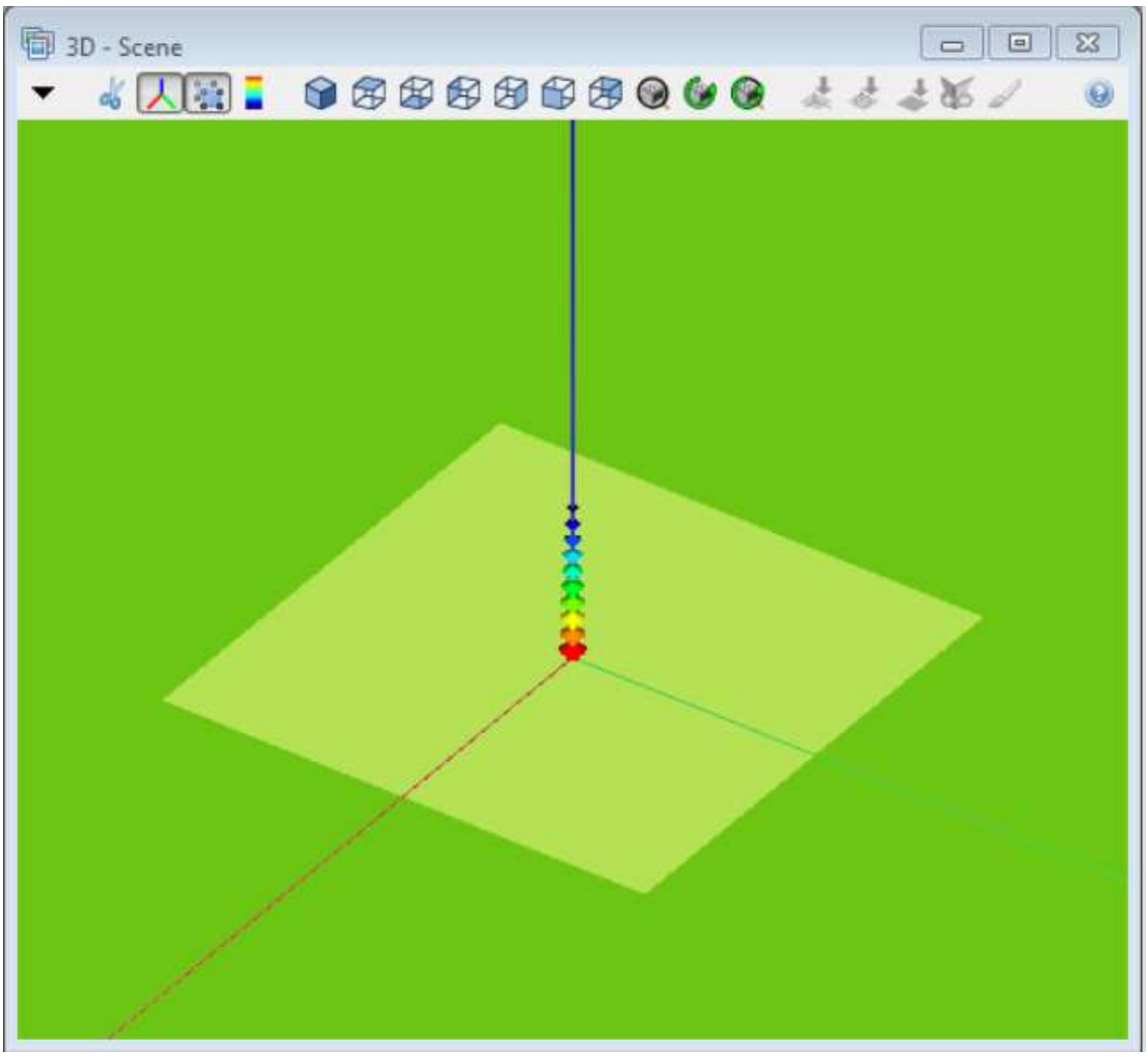


Рис. 4.15. Источники тока и земляная плата

Сохраните проект как ***Tutorial2.savant***, нажимая кнопку ***Save Project***.

4.5 Перезапуск моделирования и нанесение результатов на график

Зафиксируйте вид по умолчанию, нажимая на кнопку изометрического вида***: Default View***.

Выберите опцию ***Visible*** для узла ***Windows: 3D-Scene: Far-Field***. Это восстановит глобус дальнего поля.

Результаты цветовой шкалы из Примера 1 по-прежнему отображаются, так как все наши изменения до сих пор не изменили ключевые настройки, определяющие этот результат. Хотя мы добавили еще две антенны в структуру, мы не исключили оригинальную антенну ***short_dipole*** и не изменили её роль в качестве излучающей антенны ***Tx***.

Выберите узел ***Analysis***. В узле панели свойств ***Analysis*** измените передающую антенны ***Tx Antenna*** от ***short_dipole*** к ***current_sources_builtin*** (рис. 4.16).

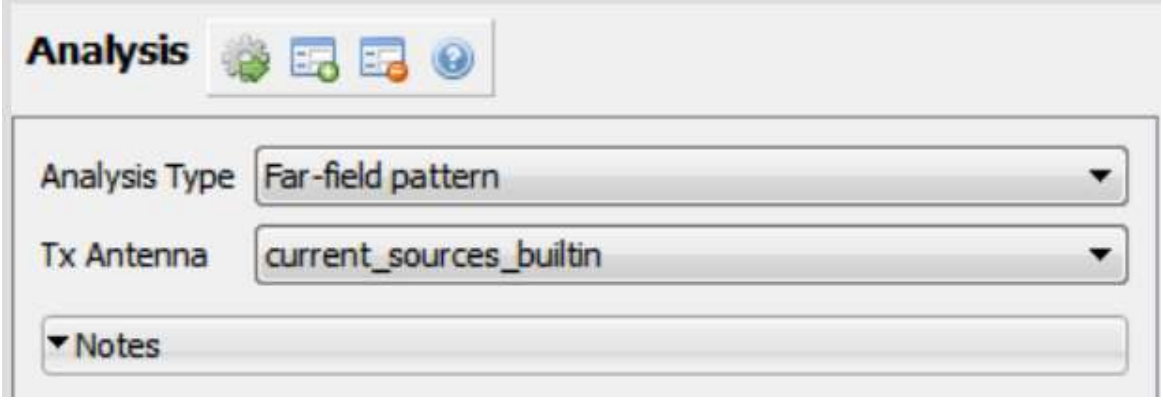


Рис. 4.16. Выбор режима анализа

Поскольку это изменяет результаты моделирования, появится диалоговое окно подтверждения с запросом о том, можно ли удалить результаты (рис. 4.17). Кликните ***OK*** для подтверждения этого.

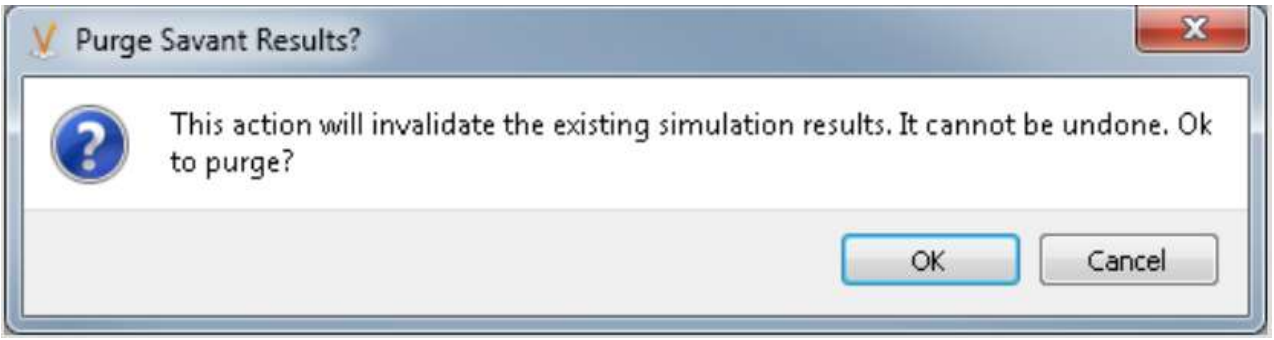


Рис. 4.17. Запрос об удалении результатов расчета

Сразу после подтверждения удаления результатов, шары маркеров с масштабированием цвета на глобусе с дальним полем изменяются на все желтые. Также будет удален узел ***Results*: *Far-Field***.

Выберите узел **Analysis:Output**, и включите ***Output Tx Antenna***. Это выведет данные расчета ***current_sources_builtin*** в результате моделирования (рис. 4.18). Позже мы будем сравнивать эти данные с полученным в узле ***current_sources_builtin***.

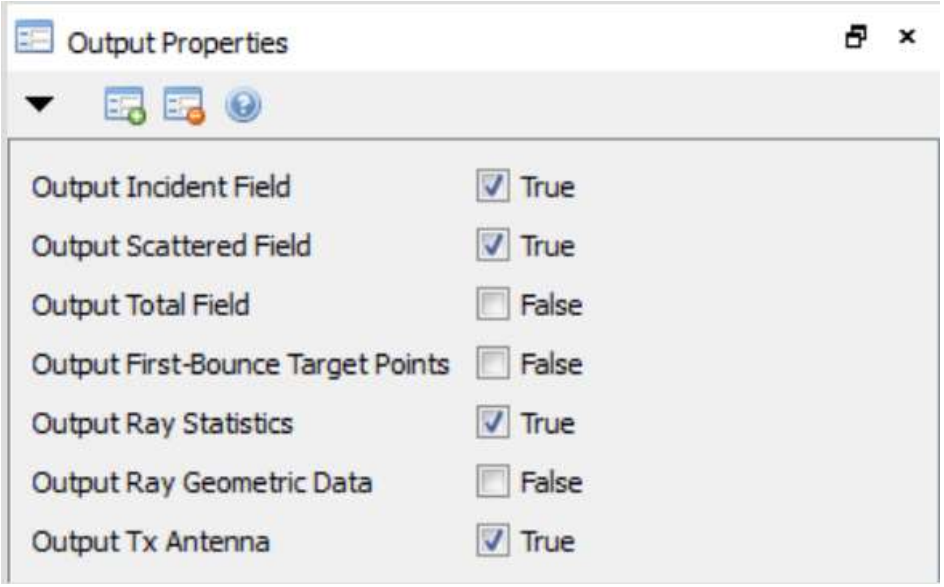


Рис. 4.18. Выбор режима вывода данных

Из главного меню ***Run***, выберите ***Run and Save***. Начнется новое моделирование, которое завершится за полминуты и только несколько секунд, если включен ***GPU Plugin***.

Когда расчет завершен, проект сохраняется и узел ***Results:Far-Field*** заполняется, а маркеры на глобусе дальнего поля показывают объемную диаграмму направленности в цвете.

4.6 Проверка источников тока используемых в моделировании

Ранее мы видели, что узел **current_sources_builtin** отображает 10 источников тока. Количество отображаемых источников тока было основано на коэффициенте, в 10 раз превышающем частоту резонанса, как описано ранее. Теперь мы сравним отображаемые источники тока с теми, которые используются для моделирования.

Кликните кнопку ***Add Antenna from File...*** в главном окне меню. Найдите директорию **Tutorial2.savant/Far-field.savant_out** и выберите файл **Tx.csrc**. Этот файл заполняется, когда ***Output Tx Antenna*** отключена от узла ***Analysis:Output***. В дереве проекта, будет виден узел ***Scene*** как узел антенны с именем ***Tx***.

Переименуйте новый узел ***Tx*** на ***Tutorial2_tx***. Опции его показываются на рис. 4.19.

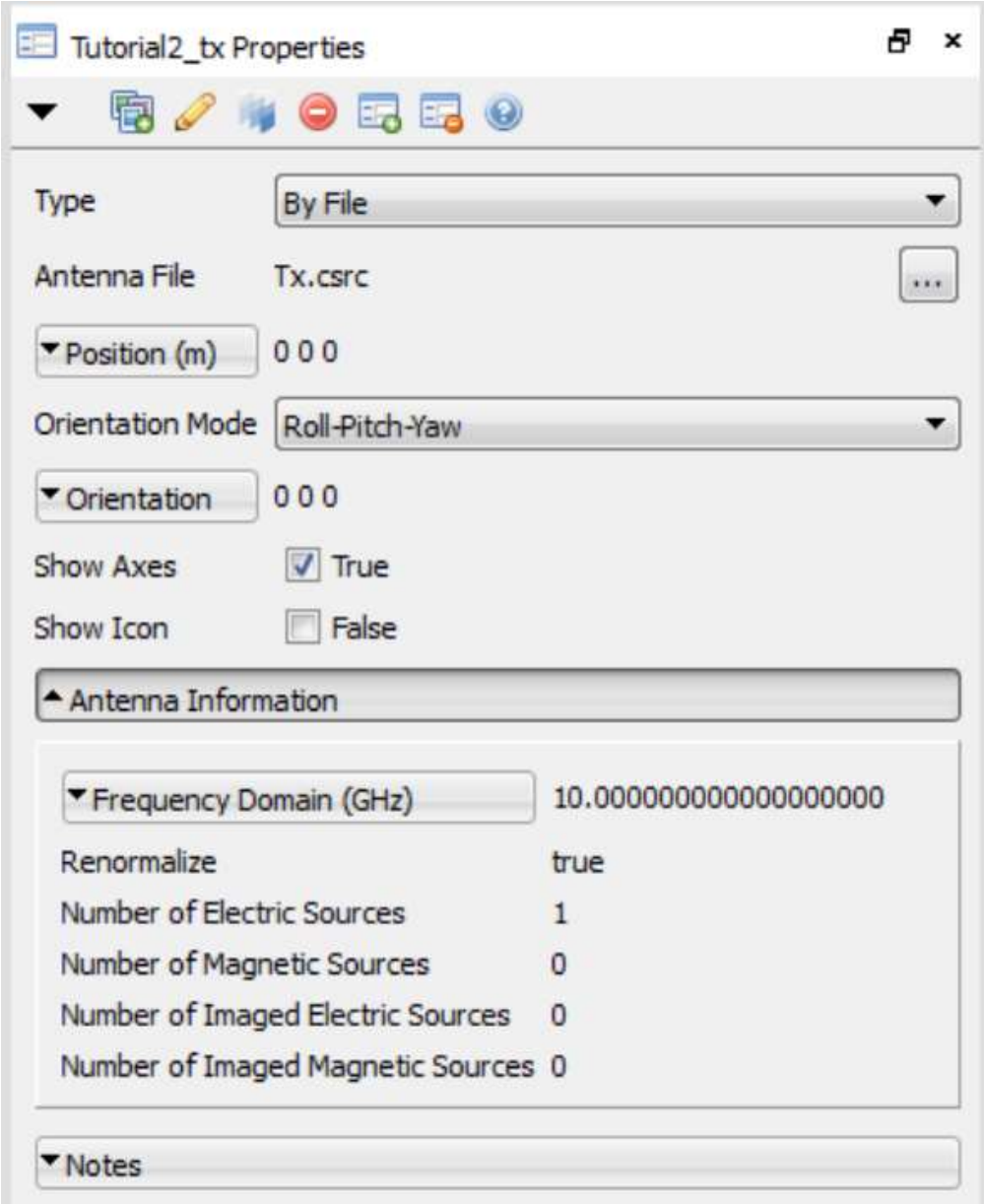


Рис. 4.19. Параметры созданной антенны Tx

Выберите узел ***Tutorial2_tx*** и раскройте ***Antenna Information***. Раздел ***Antenna Information*** показывает, что имеется только один источник тока. Это потому, что частота моделирования была установлена на 10 GHz в узле ***Analysis: Frequency***, и опция ***Current Density Oversample*** была установлена равной 1 в узле ***current_sources_builtin***. Частота моделирования и ***Current Density Oversample*** комбинируются для определения числа источников тока, возбуждаемых во время расчета, используя встроенные антенны, представленные источниками тока. Величина по умолчанию равна 1.0 для ***Current Density Oversample,*** что соответствует 4-м источникам тока на λ.

Поскольку длина монополя равна λ/4 (её резонансная частота и частота моделирования те же самые), только один источник тока создается для моделирования. Рекомендуется не устанавливать ***Current Density Oversample***

меньшим, чем 1.0, для любых встроенных антенн, которые поддерживают представление в виде источников тока.

Разверните узел ***Tutorial2_tx,*** используя правую кнопку мыши и затем выберите ***Expand All*** (рис. 4.20).

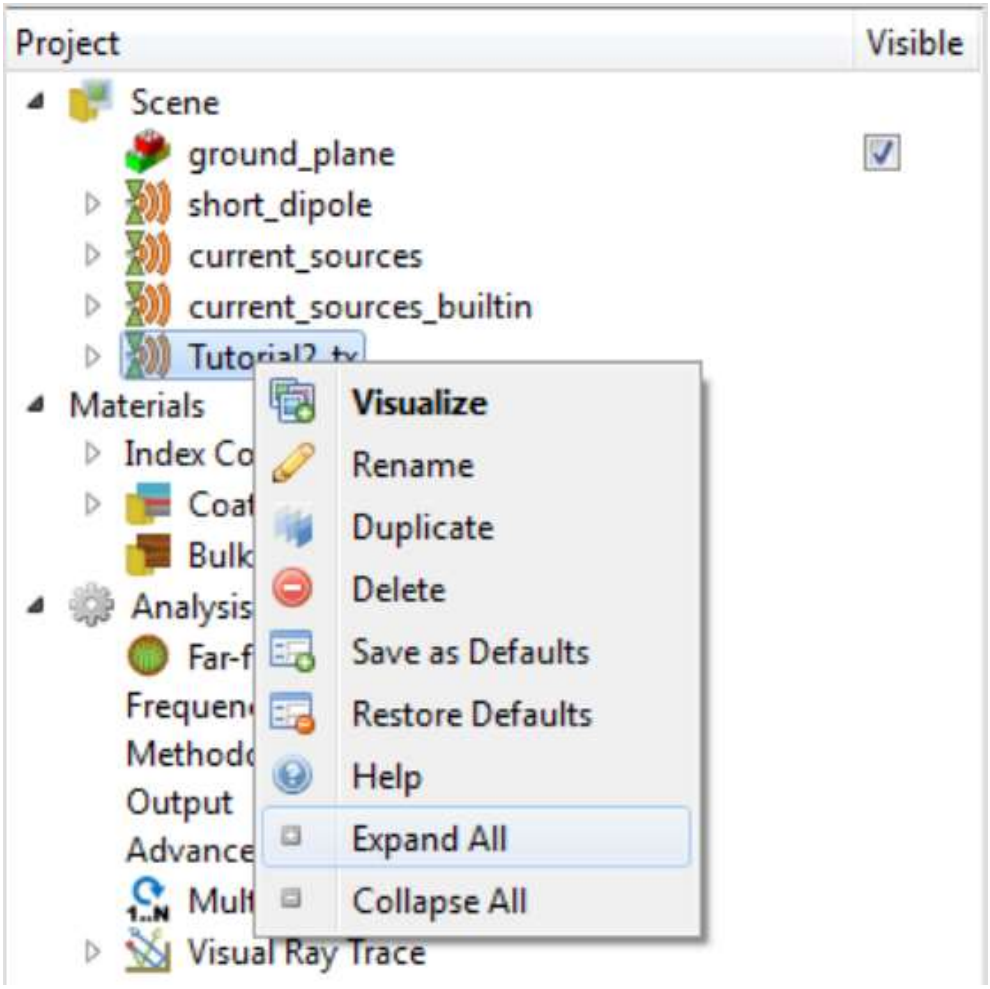


Рис. 4.20. Выбор операций действия с антенной

Отключите видимость узла **Tutorial2_tx: Ground Planes: Ground Plane 1** в дереве проекта.

Выберите узел ***Tutorial2_tx*: *Current Sources*** и отключите ***Ghost Sources*** в его панели свойств. Дважды нажмите на узел ***Tutorial2_tx*** и узел ***current_sources_builtin*** для вывода окна визуализации 3D для этих узлов.

Разместите окна ***3D-Tutorial2_tx*** и ***3D-current_sources _builtin*** рядом (рис. 4.21), чтобы видеть разницу в числе источников тока представленных на проволочной монопольной антенне во время моделирования.

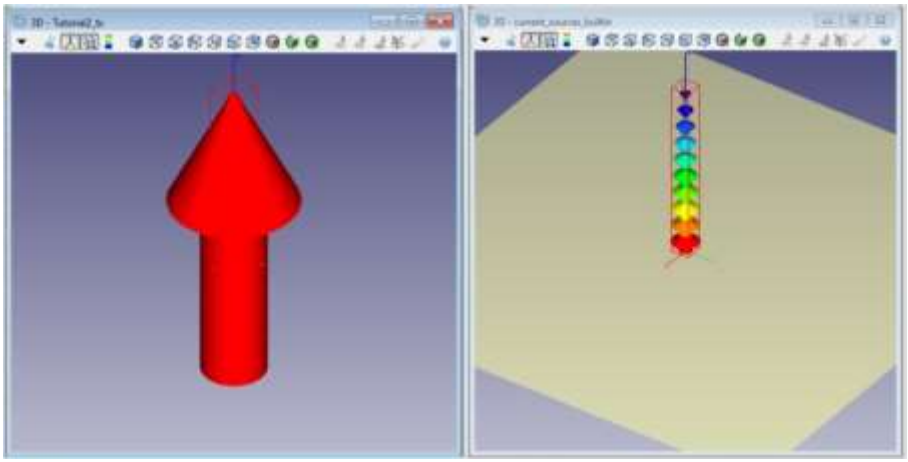


Рис. 4. 21. Элемент источника тока и весь источник тока

Закройте окна ***Tutorial2_tx*** и ***current_sources_builtin***. Отметьте ***Visible*** для узла ***Windows: 3D - Scene: Far-Field***.

Выберите узел ***Tutorial2_tx*** и отключите ***Show Axes*** в панели свойств. Отключите видимость узла **Tutorial2_tx: Current Sources**.

Выберите узел **current_sources_builtin: Current Sources**, подстройте слайдер ***Length*** приблизительно до 2.5 (рис. 4.19), и слайдер ***Thickness*** приблизительно до 0.1. Красная стрелка большого источника тока ясно видима относительно полномасштабной плоскости. Однако при таком масштабировании стрелки более слабых источников тока скрываются (рис. 4.22). Корректировка длины шкалы источников тока не меняет их абсолютных позиций, которые фиксируются их определением в файле ***current-source***.

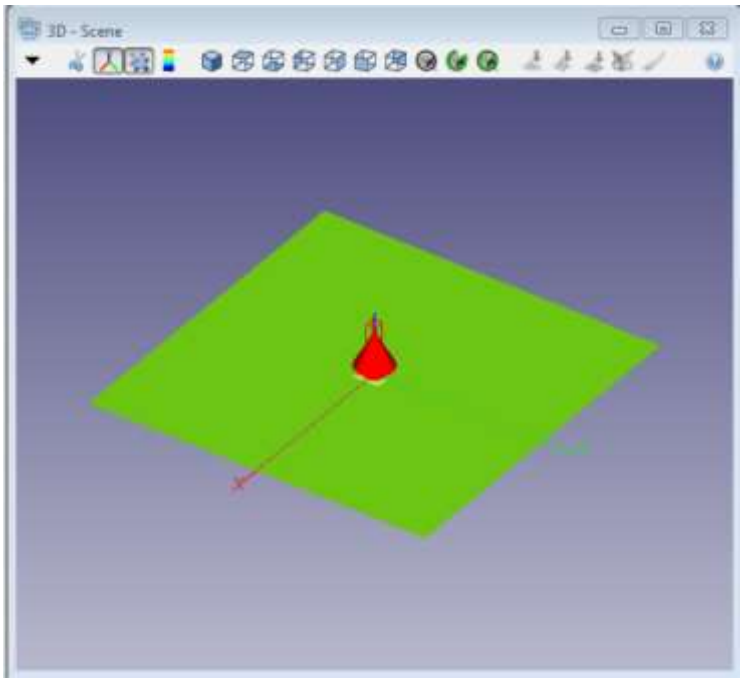


Рис. 4.22. Источник тока на земляной плоскости

4.6.1 Проверка результатов моделирования

Выберите режим ***Visible*** затем узла ***Windows: 3D-Scene: Far-Field*** чтобы снова видеть результаты в окне ***3D-Scene*** (рис. 4.23).

Выберите узел ***Windows: 3D-Scene: Far-Field***. Включите ***View as Sphere*** в его панели свойств.

Установите ***Transparency*** = 0.6. Вы увидите, что результаты будут очень похожи на результаты в Примере 1, но не идентичны.

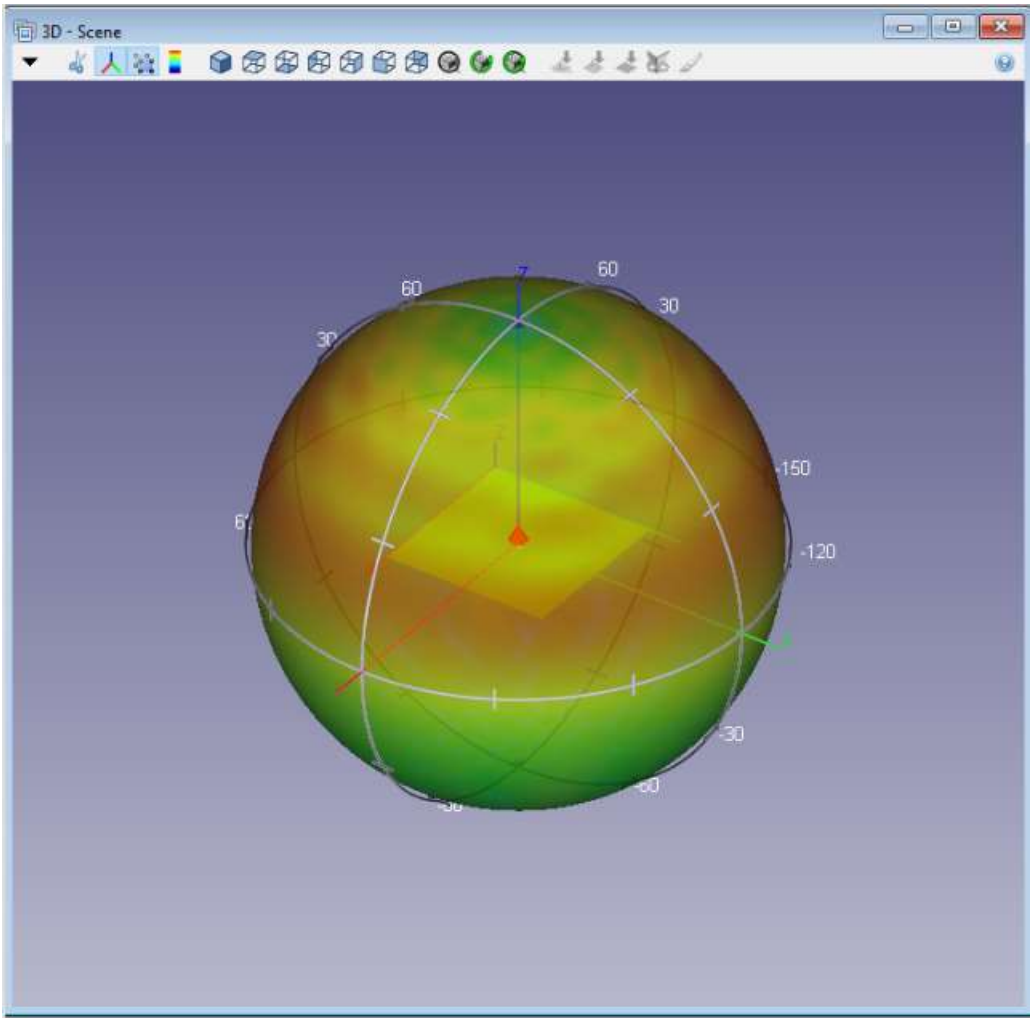


Рис. 4.23. Источник тока и ДН на поверхности круга

4.7 Нанесение на график результатов моделирования

Чтобы вывести график характеристики дальнего поля на прямоугольную систему координат, дважды кликните на узел ***Results: Far-Field***. Это выведет график ДН установленной антенны.

Перейдите к нижней части дерева проекта. В самом низу дерева проекта вы увидите узел ***Plot*** находящийся в узле ***Windows***.

Узел ***Plot*** содержит единственный узел ***Plot-Trace***, называемый ***Total Composite-pol***. Узлы ***Plot-Trace*** автоматически получают имя в соответствии с компонентой результата (***Incident***, ***Scattered***, или ***Total***), поляризацией (***Composite***, ***Vertical***, и т.д.) и результат выводится в графическом окне (рис. 4.24).

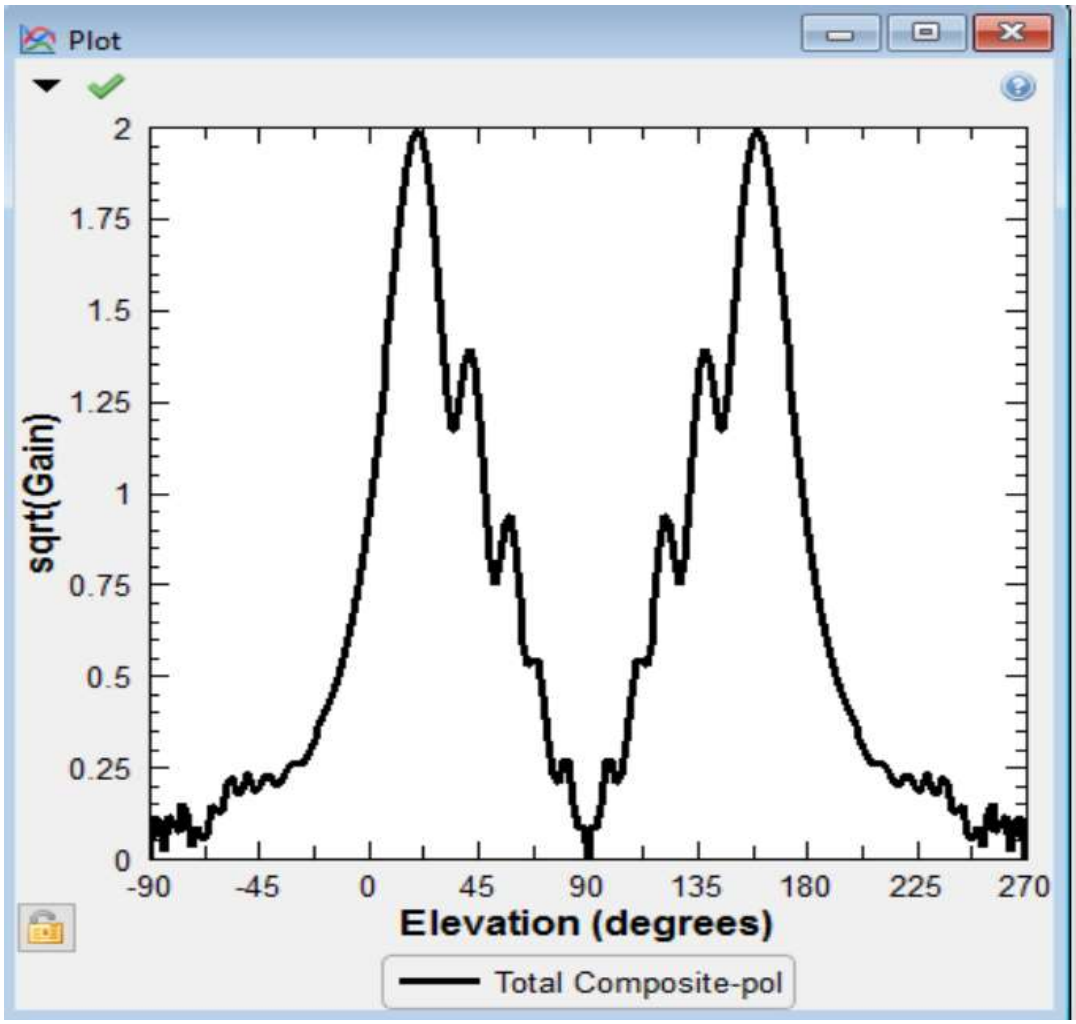


Рис. 4.24. Сечение рассчитанной ДН

На этот же график можно нанести другую характеристику.

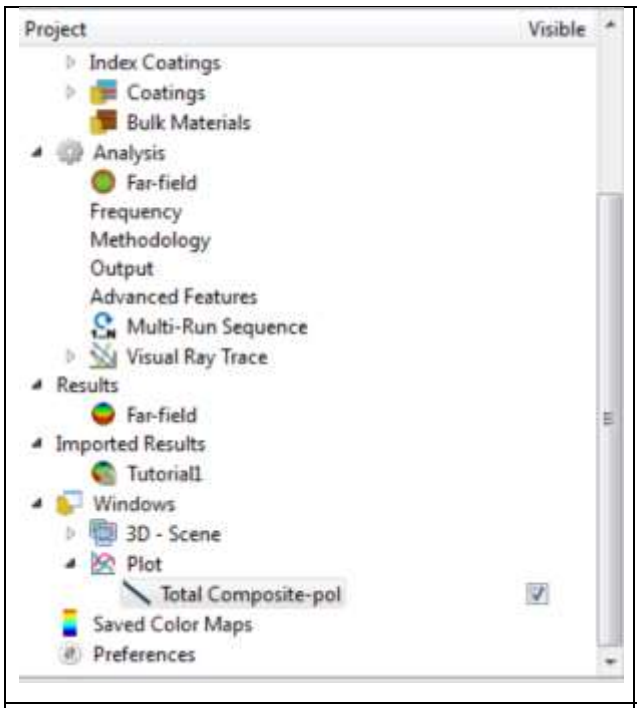


Рис. 4.25. Изменение дерева проекта после расчета

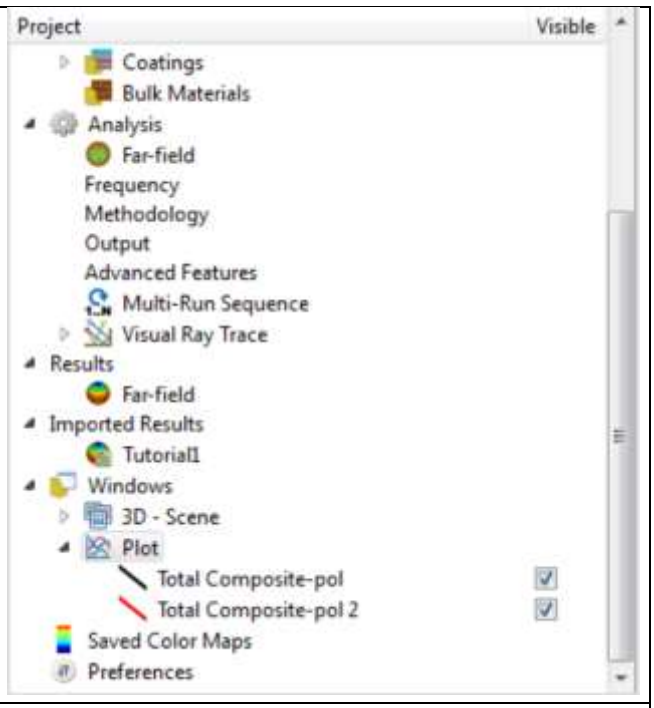


Рис. 4.26. Добавление на график результата расчета второй антенны

Выберите узел ***Results: Far-Field*** снова, задайте другую характеристику и создайте его график, который затем перетащите в окно ***Plot***. Узел ***Plot*** теперь содержит характеристику, ***Total Composite-pol 2***. Поскольку оба узла линий-характеристик нанесены на один и тот же график, они видятся как одна линия в окне ***Plot***.

Выберите узел второго графика ***Total Composite-pol 2***. Установите ***Result Component*** на ***Incident Field*** на его панели свойств. Окно ***Plot*** теперь показывает дополнительную красную линию падающего поля источников тока (в присутствие земляной платы).

Также вторая линия графика переименовывается на ***Inc Composite-pol*** (рис. 4.28-4.29).

Рис. 4.27. Диалог свойств графика в прямоугольной системе координат

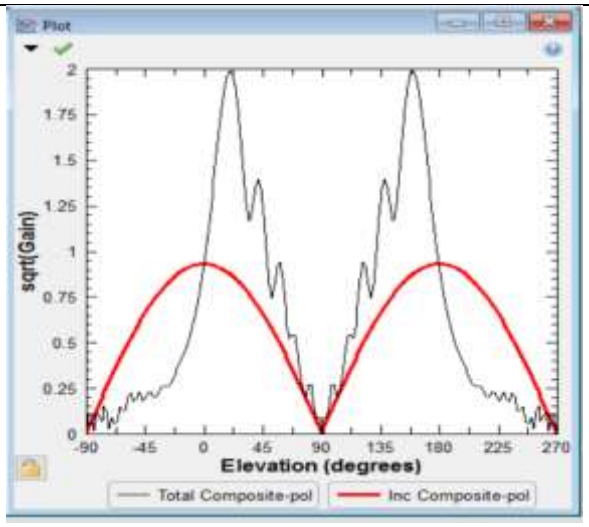


Рис. 4.28. Две характеристики на одном графике (общая и падающая компоненты)

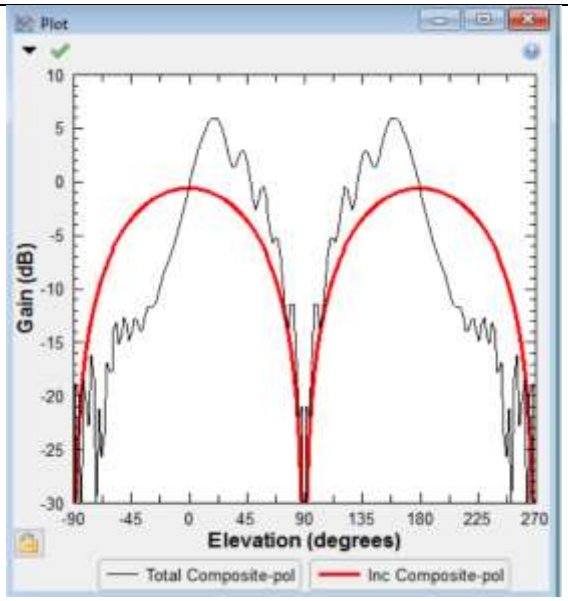


Рис. 4.29. Установка диапазона по оси y равной 40 дБ (это можно масштабировать вручную с помощью мыши)

Величины по оси y имеют наименование **sqrt(Gain)**. Это произошло потому, что масштаб характеристики установлен на ***Magnitude***, который пропорционален модулю электрического поля.

В узле ***plot-trace***, установите ***Scale*** как ***Power***. Обе характеристики подставляются и нанесены по оси Y. Несмотря на то, что вы изменили параметр ***Scale*** только для одной характеристики, другая должна быть пересчитана, так как характеристики в окне должны иметь одинаковый масштаб по оси Y.

Установите опцию ***Scale = Decibel***. Обе характеристики представляются по оси Y как ***Gain (dB)*** (рис. 4.31).

Определить пиковое увеличение общего поля Total Composite-pol можно при нажатии левой кнопкой мыши на максимум графика. Когда вы это сделаете, курсор приобретет форму креста и рядом с ним появляется значения X - и Y-координат.

Вы должны получить результат приблизительно (20, 5.9), показывающий пик при ***Elevation*** = 20° и равный ***Gain***= 5.9 dB. Обратите внимание, что эта функция не фиксируется на ближайшей точке линии характеристики; она всегда сообщает координаты в центре перекрестья.

Выберите узел ***Inc Composite-pol***. Установите ***Result Component*** на ***Incident Field (Ground Plane)*** в панели свойств. График становится красным. Уровни поля становятся больше в диапазоне высот от 0º до 180º, а вне этого диапазона поля равны 0 (-бесконечность в масштабе дБ). Это происходит из-за того, что компонента ***Incident Field (Ground Plane)*** зависит от земляной плоскости в графике падающего поля.

Кроме того, второй участок трассировки узлов переименован в ***Inc (GP) Composite-pol***, с указанием падающего поля при наличии земляной плоскости.

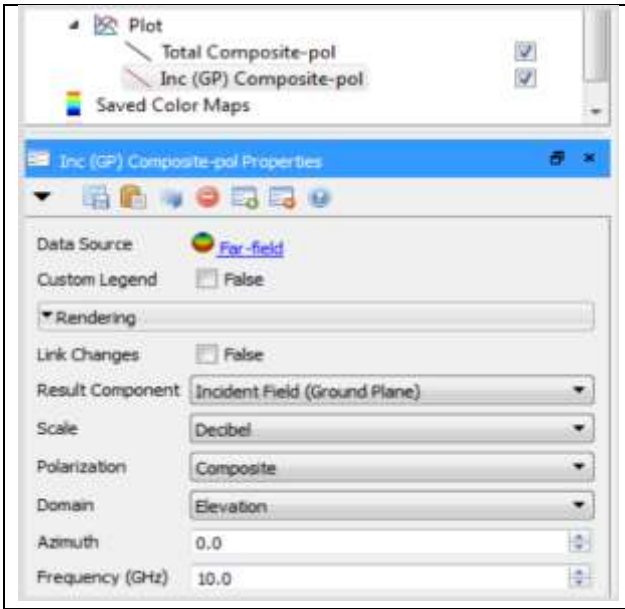


Рис. 4.30. Включение графика ДН на земляной плоскости

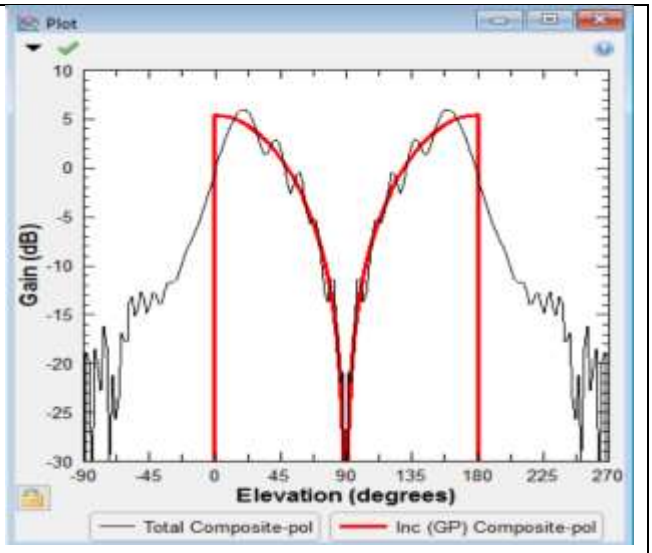


Рис. 4.31. ДН с учетом земляной плоскости (красным)

Установите ***Result Component*** второго узла ***plot-trace node*** назад на характеристику ***Incident Field.***

4.7.1 Тонкая подстройка графиков

Выберите узел ***Windows:Plot*** в дереве проекта. Установите значения в их панелях следующими:

- ***X-axis folder***: ***Min*** = -90, ***Max*** = 270.
- **Y-axis folder**: Min = -40, Max = 10.
- ***Major Grid Line Style: Dashed*** (линии в виде сетки).

Отредактируйте поле текста ***Title*** для чтения как "***Monopole on Square Plate***" (монопольная антенна на квадратной плоскости) (рис. 4.32).

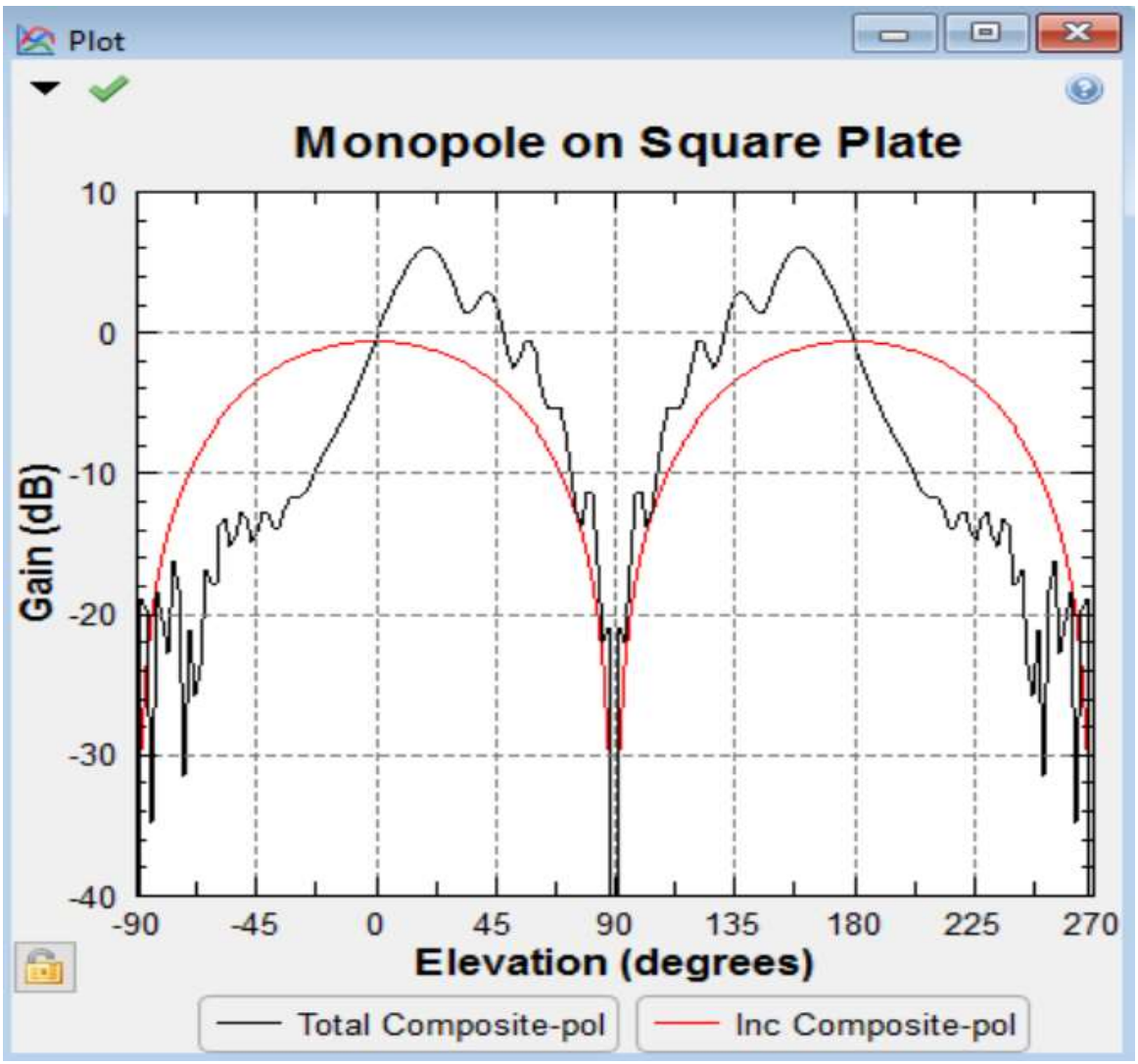


Рис. 4.32. ДН монопольной антенны на квадратной плоскости

В программе ***Savant*** можно выбрать разные стили линий. Выберите узел линии трассы ***Total Composite-pol***. В панели свойств разверните панель ***Rendering***. Установите ширину линии ***Line Width*** = *2*. Выбор ширины линии позволяет выделить разные характеристики.

Поэкспериментируйте с различными вариантами ***Style, Line Color***, и ***Symbol***, доступными в этой папке панели, и по окончании установите исходные настройки:

- ***Style*** = ***Lines.***
- ***Line Color*** = ***black.***
- ***Symbol*** = ***NoSymbol***.

Также установите ***Line Width*** узла характеристики ***Inc Composite-pol*** на значение *2*. Окончательно график должен выглядеть как рис. 4.32.

4.8 Экспорт графика в виде файла

Savant заполняет окна и 3-D сцены, которые могут быть экспортированы в виде файлов изображений с расширением ***.png*** и ***.jpg.***

В верхнем левом углу окна графика (рис. 4.33) щелкните стрелку вниз, чтобы открыть раскрывающееся меню, а затем нажмите кнопку ***Save Snapshot***. В файловом браузере, который появляется, перейдите в каталог ***Tutorials2***. Сохранить графики в формате ***MonopoleSqPlate. png***.

4.9 Импорт результатов из примера 1 и сравнение его с полученными результатами

Для того, чтобы выполнить перезагрузку проекта, кликните кнопку ***New Project*** в главном меню. Загрузите проект ***Tutorial2.savant***, сохраненный в конце шага 3. Заметим, что появились оба окна ***3D-Scene*** и окно ***Plot***.

В дереве проекта, прокрутите и разверните узел ***Windows*** и затем узел ***Plot***. Выберите узел характеристики ***Inc Composite-pol***.

В инструментальной линейке сверху панели свойств, кликните иконку ***Delete*** для удаления этой характеристики из графика (4.33).

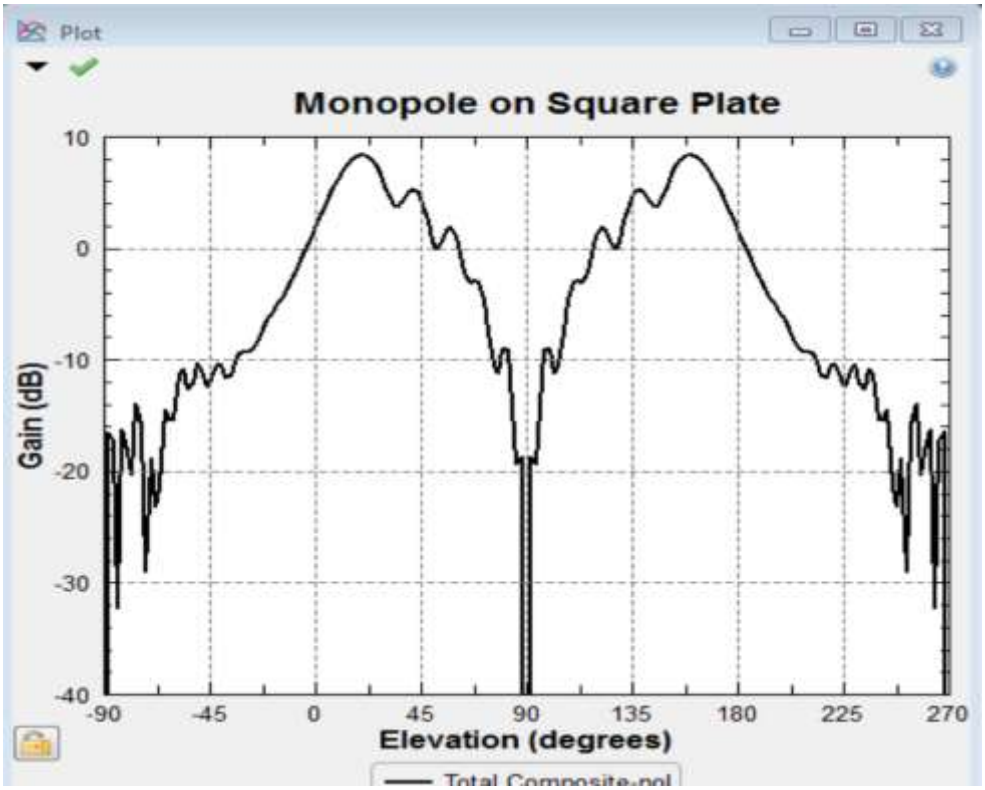


Рис. 4.33. Сечение ДН антенны на прямоугольной плате

4.9.1 Импорт результатов расчета из Примера 1

Кликните правой кнопкой на узел ***Imported Results*** и выберите ***Import Results from File....*** (рис. 4.34).

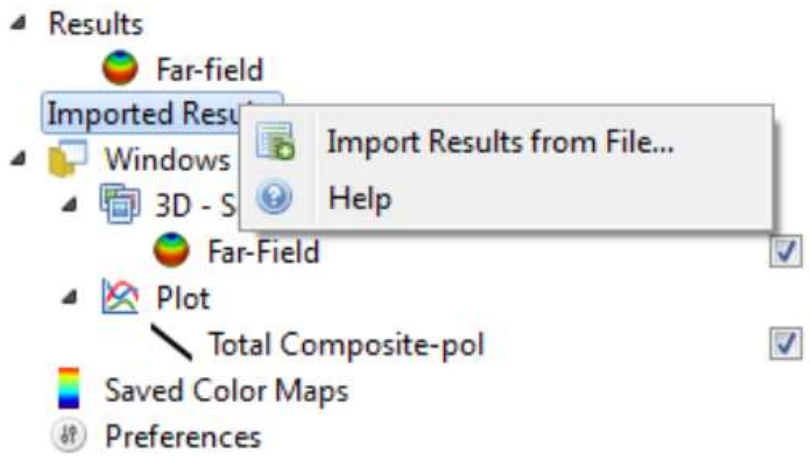


Рис. 4.34. Импорт данных из файла

В появившейся поисковой системе найдите директорию ***Tutorial1*** и поддиректорию ***Tutorial1.savant/Far-field.savant_out***. Это папка результатов предыдущего раздела, и она содержит все файлы, связанные с этим проектом.

Дважды нажмите на ***FF.dlxcd***. Этот файл содержит результаты моделирования в формате табличных данных. Результаты моделирования загружаются и добавляются как новый узел ***Tutorial1*** под узлом ***Results*** (рис. 4.35).

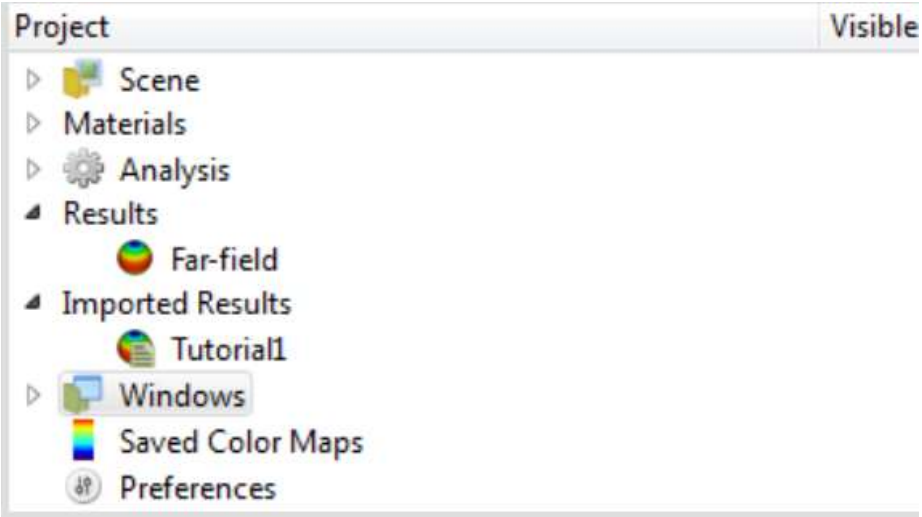


Рис. 4.35. Импортированные результаты в дереве проекта

4.9.2 Добавление импортируемых результатов на график

Переместите указатель мыши на узел ***Tutorial1***, удерживайте левую кнопку мыши и перетащите этот узел в окно графика результаты Примера 1, которые теперь должны отображаться в виде красной линии на рис. 4.36.

Выберите узел ***Plot*** и задайте границы *Y*- оси как -40 dB и 10 dB.

Выберите узел второй линии характеристики, ***Total Composite-pol 2***.

В верхней линии панели свойств показывается ***Data Source*** как ***Tutorial1***. Поле ***Data Source*** узла ***plot-trace*** идентично узлу результата, который представлен. Установите ширину линии ***Line Width*** = *2* в панели ***Rendering***.

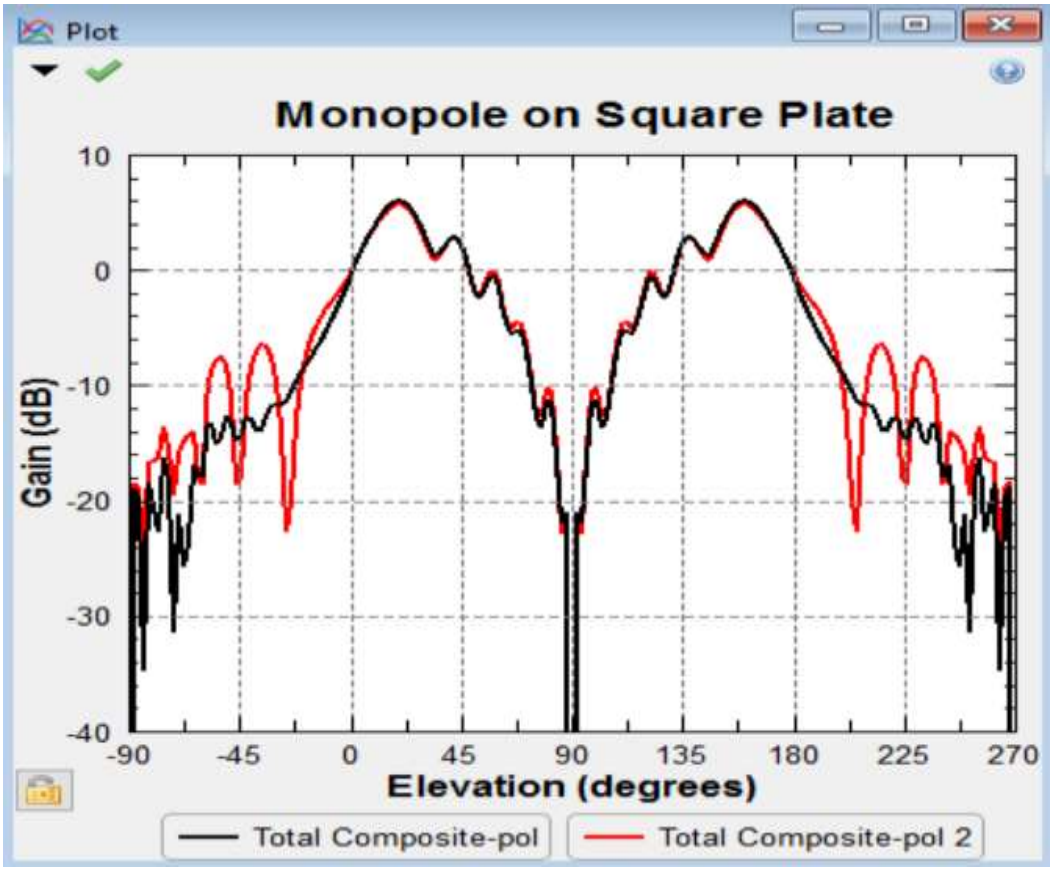


Рис. 4.36. Две ДН на одном графике

Выберите узел первой характеристики, ***Total Composite-pol***. Во вводе ***Data Source,*** показывающей ***Far-Field***, это означает представление результатов моделирования дальнего поля в текущем проекте, но не импортированные результаты.

Нажмите ***Custom Legend*** *и* измените надпись на «***Current Sources Input***». Заметьте, однако, что имя узла характеристики в дереве проекта остается ***Total Composite-pol***. Имя узла характеристики и соответствующая легенда пока остаются теми же самыми (рис. 4.37).

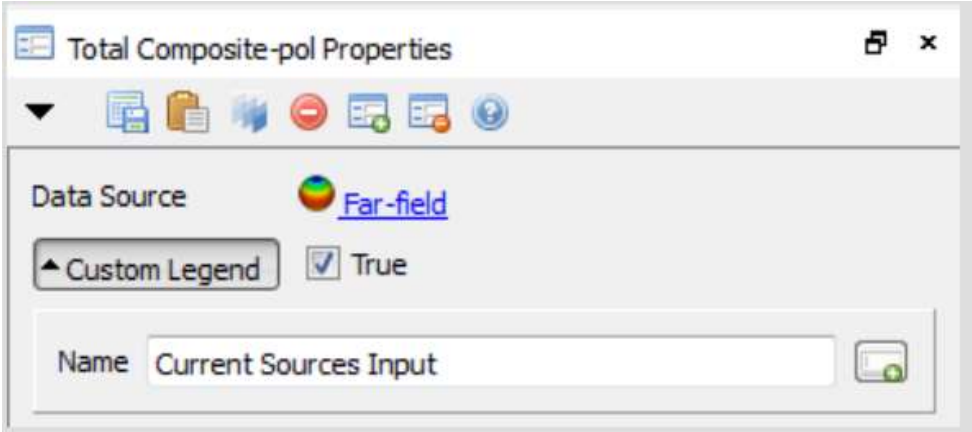


Рис. 4.37. Внесение названия графика

Выберите узел характеристики ***Total Composite-pol 2***. Активизируйте режим ***Custom Legend*** и внесите её как ***FF Pattern Input***. Выберите узел ***Plot*** и измените название всего графика на ***Monopole: Compare Source Models*** (сравнение моделей источника, рис. 4.38).

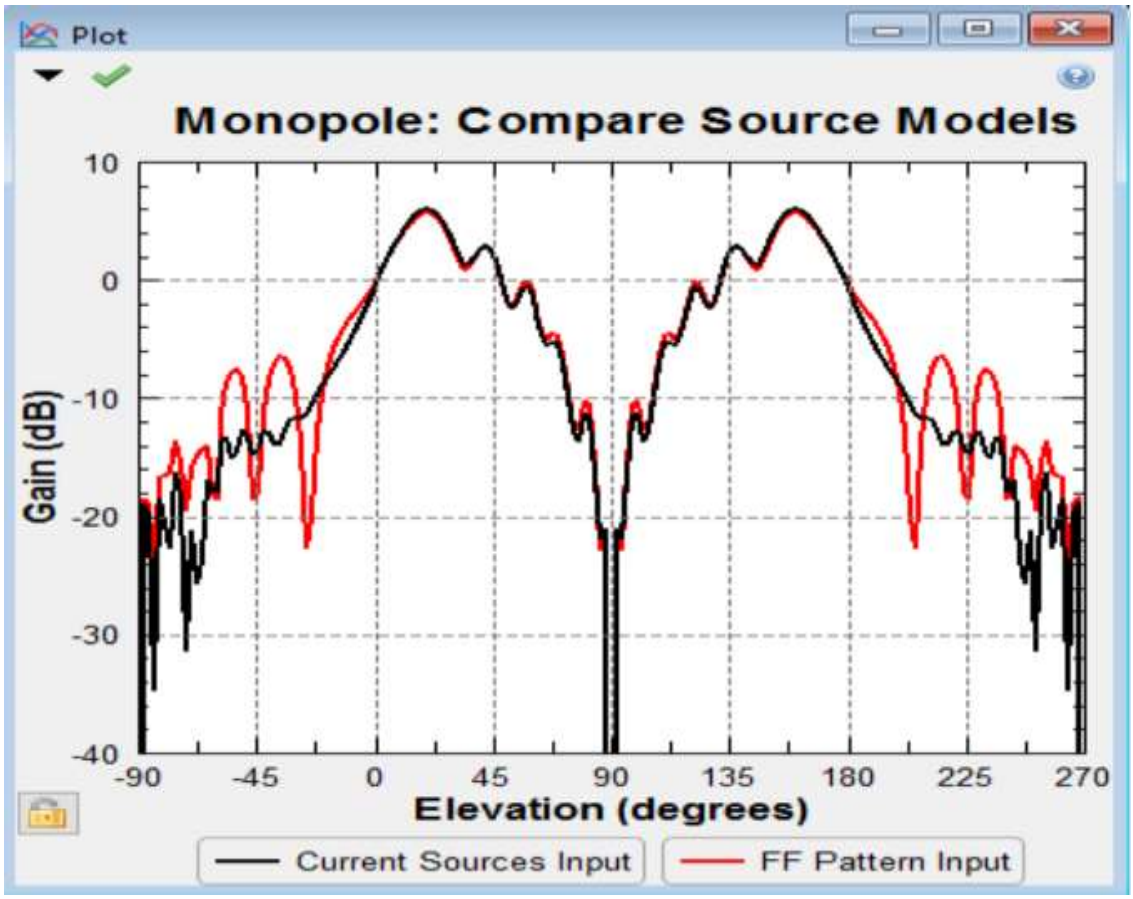


Рис. 4.38. Сравнение моделей монопольной антенны

4.10 Изменение параметров для создания многомерных графиков

Графики, созданные до сих пор, предназначены для сечений по углу места при азимутальном угле ***azimuth***=0. Тем не менее, результаты моделирования были сгенерированы по всей сфере углов, поэтому есть много других сечений 2D графиков, которые можно нанести на один график.

4.10.1 Модификация графика нового азимутального сечения

Выберите узел ***Total Composite-pol*** (рис. 4.35). В панели свойств ***Domain*** показывает ***Elevation***, меридиональные углы по оси *x* (рис. 4.40). Снизу поля ***Domain*** находятся переменные ***Azimuth*** и ***Frequency (GHz)***.

Измените угол ***Azimuth*** нажимая на стрелку справа этого поля в окне графика, черный график обновляется, но красная линия (рис. 4.39) остается неизменной. Это происходит потому, что Savant не может автоматически сохранять переменные между характеристиками при синхронизации. Это позволяет сравнивать разные сечения одних и тех же данных на одном графике.

В этом случае, однако, мы сравниваем результаты из двух разных наборов данных (***Tutorial 1*** и ***Tutorial 2***), поэтому мы хотим, чтобы две зависимости были синхронизированы. Можно синхронизировать их вручную, если выбрать опцию ***Link Changes***.

Тогда показ обоих участков будут связаны, и будут изменяться синхронно, при добавлении данных. Установите угол ***Azimuth*** = 44 градусов, непосредственно вводя значение в поле ***Azimuth*** и нажимая ***Enter*** (рис. 4.39).

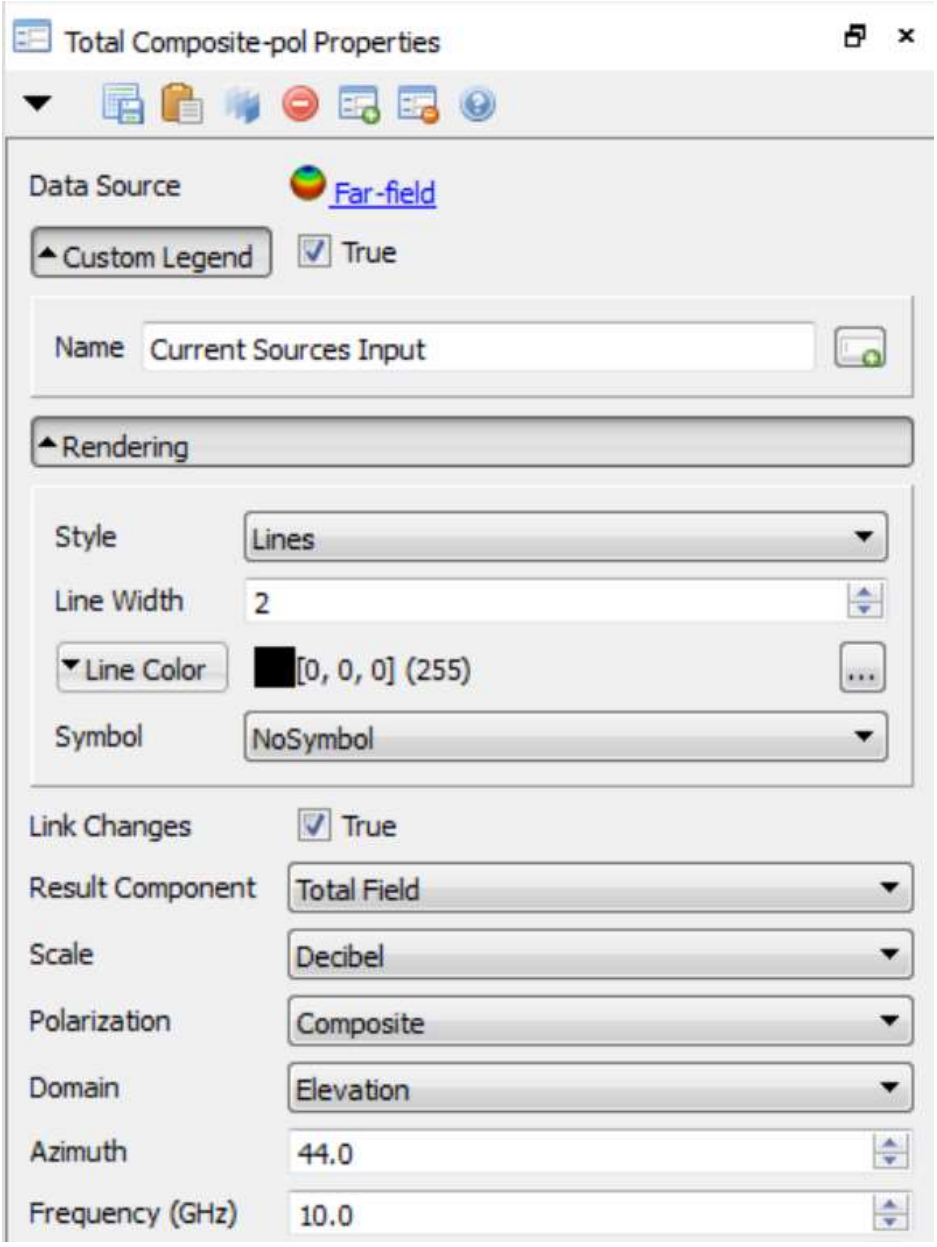


Рис. 4.39. Включение опции синхронного изменения

Обе зависимости обновляются, как только вы измените переменные.

Выберите узел ***Plot*** и измените диапазон величин *Y*-оси от -40 dB и 10 dB. Измените название графика на «***Monopole: Compare Source Models, AZ = 44 deg***» (рис. 4.40).

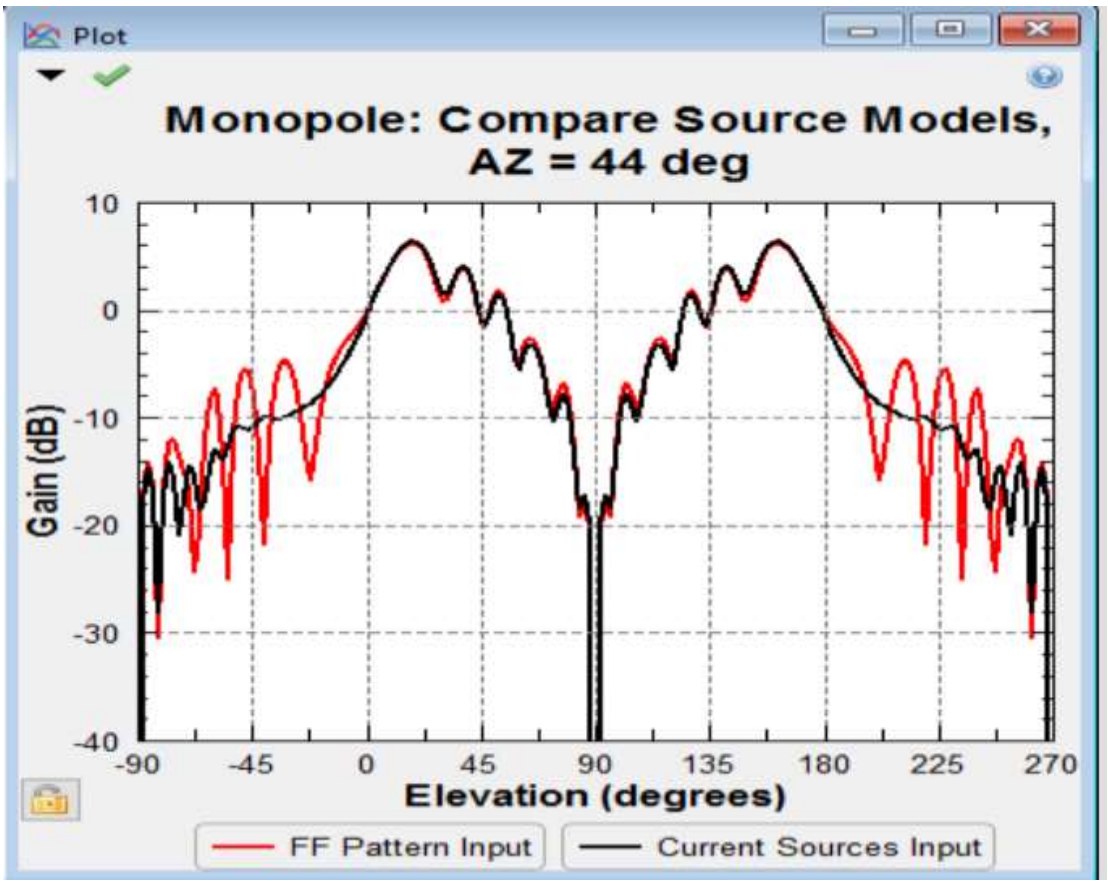


Рис. 4.40. Две характеристики на одном графике

Для земляной плоскости в виде квадрата, представляют интерес два азимутальных угла ***AZ*** = 0 и ***AZ*** = 45°. Мы изменяем ***AZ*** = 44 , потому что угол области дальнего поля был уставлен в ***Примере 1*** (и в ***Примере 2***) от 0 до 180° через 4°. Если вы ввели *Azimuth*= 45° при установке слайдера переменных, AZ автоматически изменится на 44°, ближайшую точку выборки.

4.10.2 Модификация графика для просмотра азимутальной плоскости

Выберите узел ***plot-trace*** как ***Total Composite-pol.*** Выберите область ***Domain*** как ***Azimuth***. Это выберет ось *x* как азимут (***Azimuth***), а ***Elevation*** становится изменяемой переменной.

Установите ***Elevation*** = 0. Другое значение слайдера в узле ***Elevation*** устанавливается равным 0, потому что опция ***Link Changes*** заблокирована.

Выберите узел ***Plot*** и разверните папку панели ***Y-axis***. Установите ***Y-axis Max*** = -0.15 и ***Y-axis Range (dB)*** = 0.55. Подставьте название графика «***Monopole: Compare Source Models, EL = 0***» (рис. 4.41).

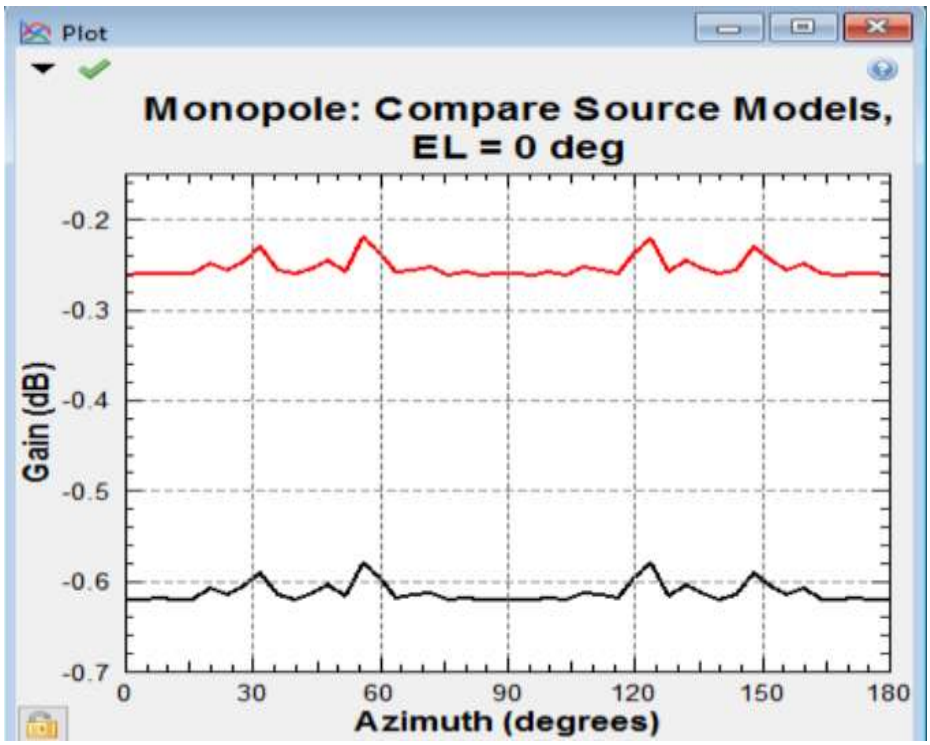


Рис. 4.41. Сравнение ДН антенн в азимутальной плоскости

4.11 Создание полярного графика

Выберите узел ***Results:Far-Field.*** Кликните кнопку ***Polar Plot***. Перетащите узел ***Imported Results:Tutorial1*** на окно полярного графика, в результате чего ДН из примера 1 будет показана в полярной системе координат (рис. 4.42).

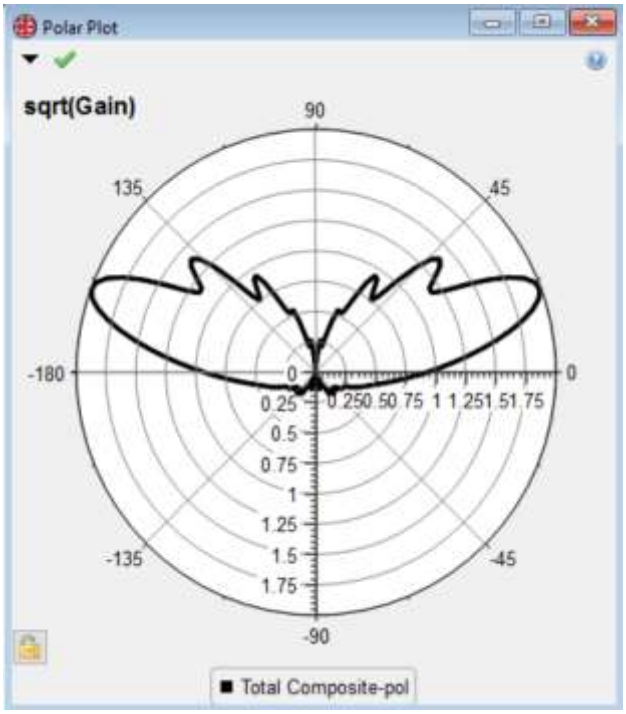


Рис. 4.42. Создание графика в полярной системе координат

В одном или двух узлах, содержащих график ***Polar Plot***, установите ***Scale*** на ***Decibel***. Выберите узел ***Polar Plot*** и разверните папки панели ***Radial-Axis***. Установите ***Radial Max*** =10 и ***Radial Range (dB)*** = 50.0.

5 АНТЕННЫ НА МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМАХ

Рассмотрим возможности объединения моделей CAD с помощью добавления и группировки моделей CAD. Покажем, как добавить различные покрытия (рис. 5.1), а также добавлять различные индексы покрытия, присваивать их отдельным поверхностям модели и изменять связанные с ними свойства материала на примере самолета с винтами и моторами. Будем изменять положение винтов и двигателей для случаев от вертикального взлета до посадки. Установленная схема монопольной антенны, размещенной на поворотном моторе, будет моделироваться и прорисовываться в обеих конфигурациях.

Содержание

- Загрузка и объединение нескольких CAD моделей.
- Группировка моделей и использование узлов ***Scene Group*** для вращения осей в заданной конфигурации.
- Использование свойства ***Keep Result.***

Шаги этого примера:

1. Загрузка нескольких CAD моделей.
2. Модификация свойств CAD моделей.
3. Группирование CAD моделей.
4. Добавление антенны к сцене.
5. Запуск лучей в сцене.
6. Установка, запуск на моделирование и вывод результатов расчета.
7. Создание нового проекта и добавление CAD моделей для вращающегося наклонного V-22 двигателя.
8. Группирование различных CAD моделей и добавление антенны.
9. Запуск на расчет и сравнение результатов.

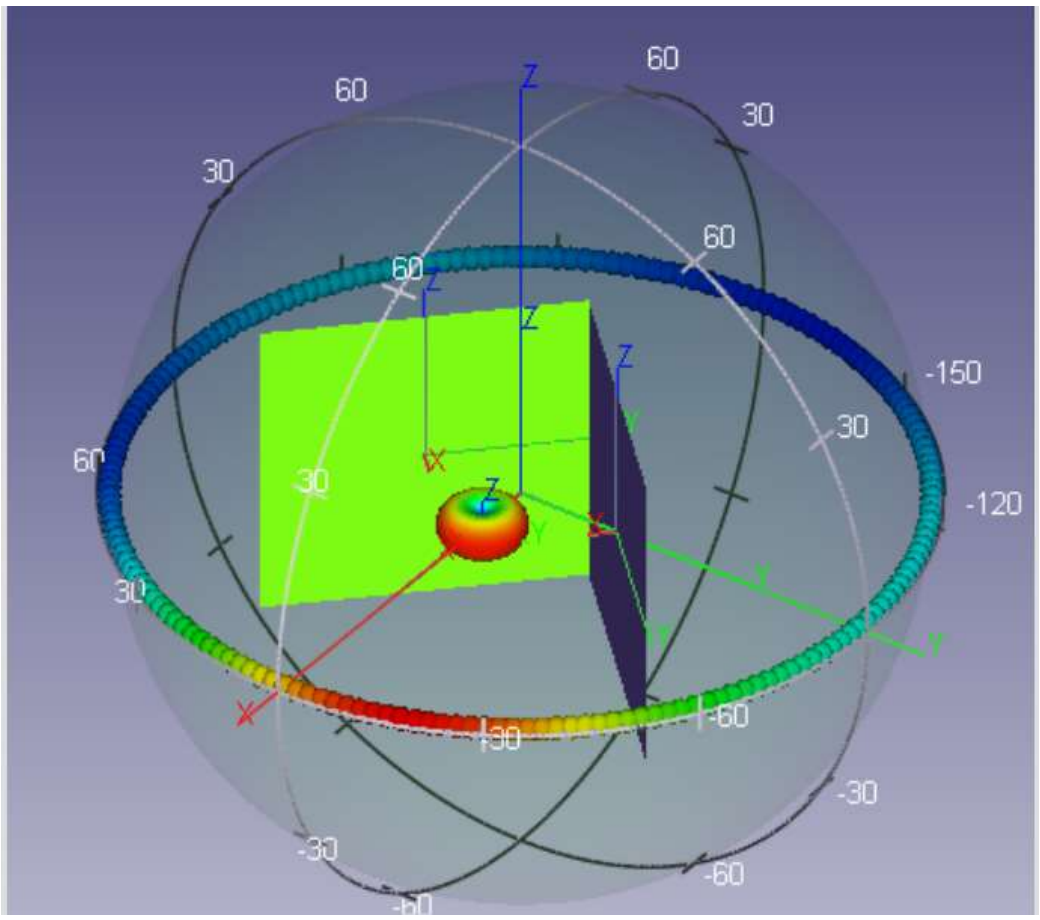


Рис. 5.1. Две перпендикулярные плоскости и антенна, стоящая на одной из них

Запустите Savant, кликните в разделе **Scene** кнопку ***Add CAD***, и в директории ***Tutorial3*** выберите ***plate11.facet***. Появляется диалог масштабирования единиц длины (рис. 5.2). Все CAD модели в этом примере используют метры, так что кликните ***Cancel***.

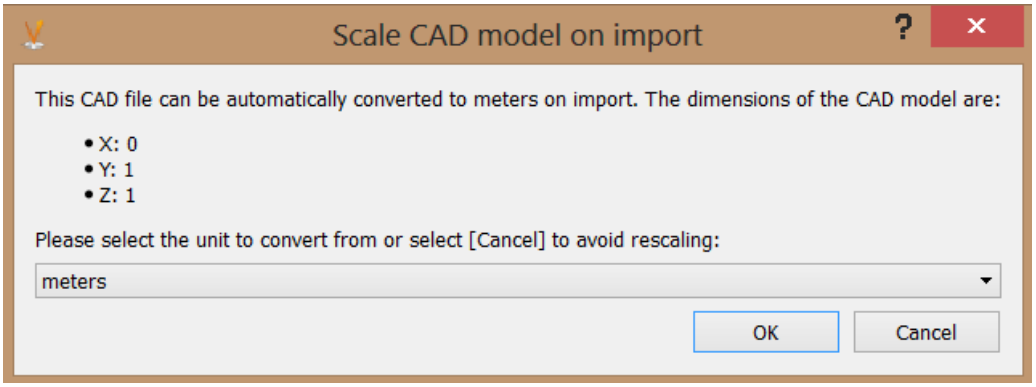


Рис. 5.2. Добавление и масштабирование модели плоскости

Модель CAD-Model с именем ***plate11*** будет добавлена в узле ***Scene 3***. Сохраните новый проект в директории **Tutorial3** под именем ***Tutorial3***.

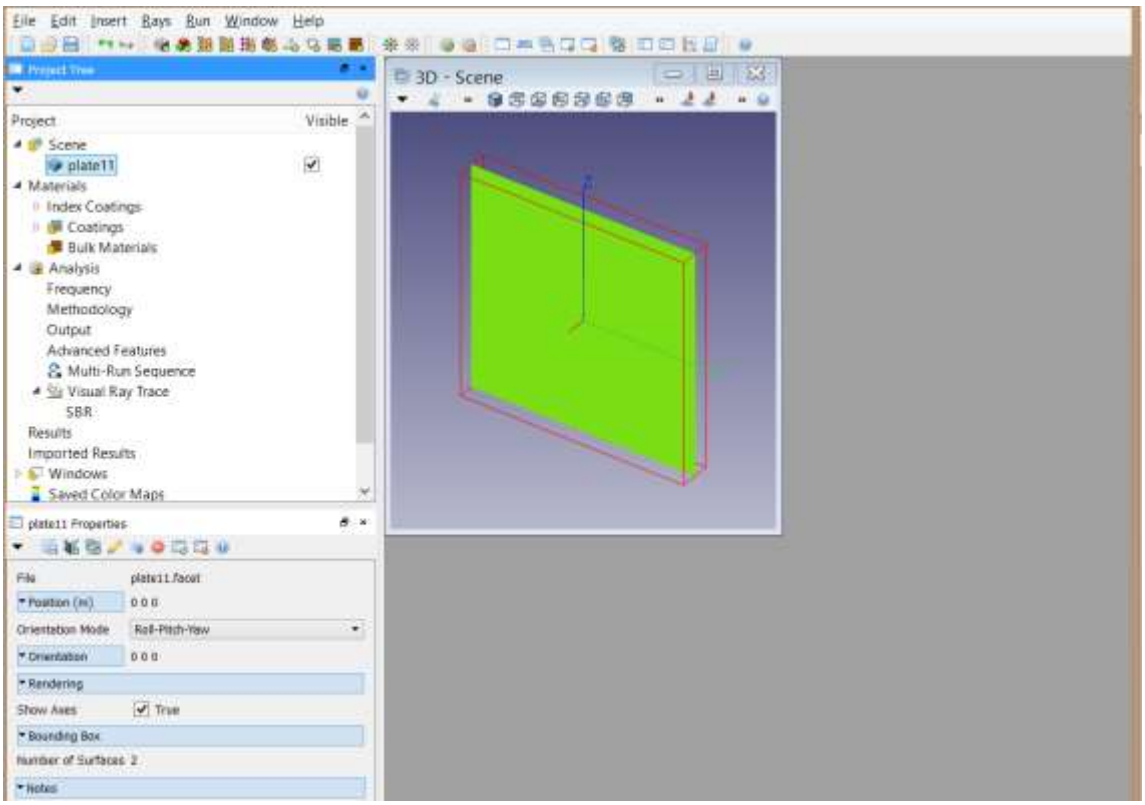


Рис. 5.3. Создание плоскости plate11

5.1 Добавление другой плоскости в проект

Добавьте другую плоскость, нажимая ***Add Parametric CAD***. Выберите узел ***Plate***. По умолчанию создается плоскость размером 1x1 метр. Это точно та же модель, как и загруженная на шаге *1.1*, только с другим центром координат (рис. 5.4).

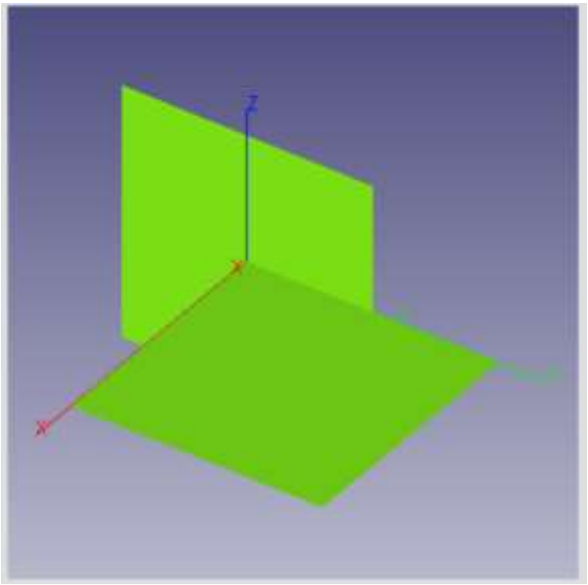


Рис. 5.4. Две перпендикулярно расположенных плоскости

Хотя пример можно было бы продолжить с помощью этих двух различных плоскостей, мы сделаем копию модели, полученную из шага 1.1. Эту копию можно получить с помощью любого из двух вариантов, указанных ниже. Поэтому выберите узел ***Plate*** и удалите его. Выберите узел ***plate11*** и нажмите кнопку ***duplicate*** на панели свойств узла. Новый узел CAD модели с именем ***plate11 2*** добавится под ***Scene***. Мы не увидим различия, поскольку обе CAD модели одинаковы и расположены одна над другой.

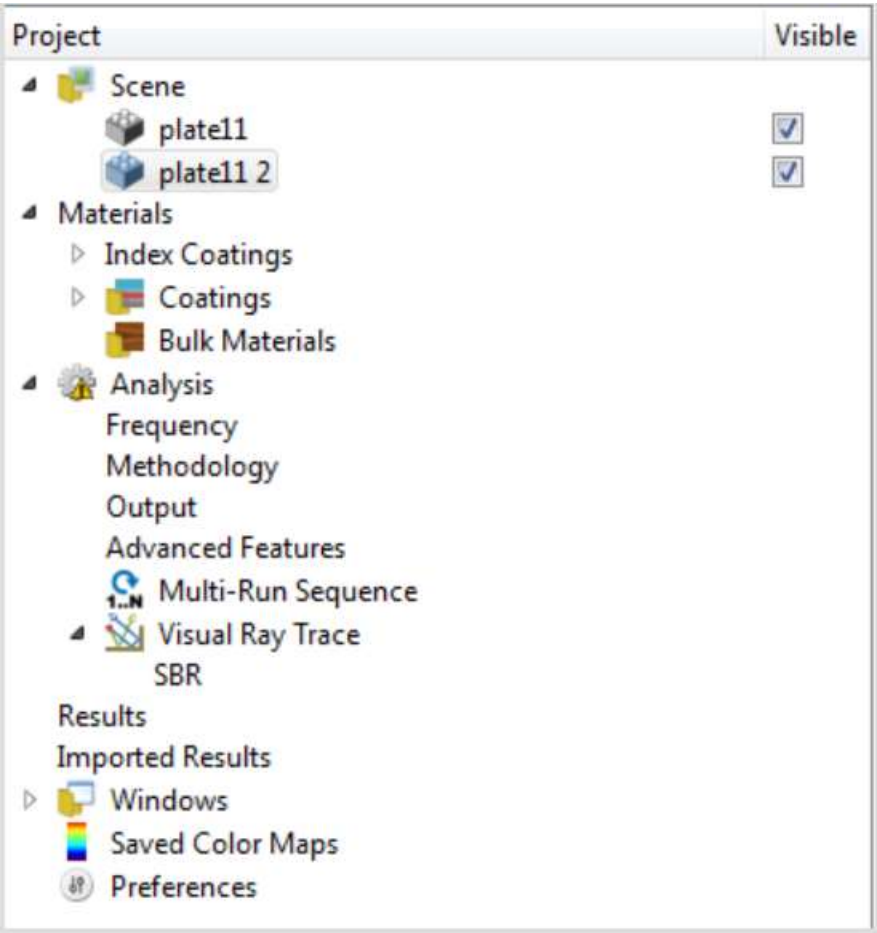


Рис. 5.5. Проект с двумя пластинами

5.2 Модификация свойств модели CAD

Выберите узел ***plate11*** переименуйте его на ***plate_right***. Разверните папку ***Position*** в узле панели свойств. Затем установите положение *Y* на *0.353553*. Плоскость будет сдвинута на величину, введенную в панели свойств (рис. 5.6).

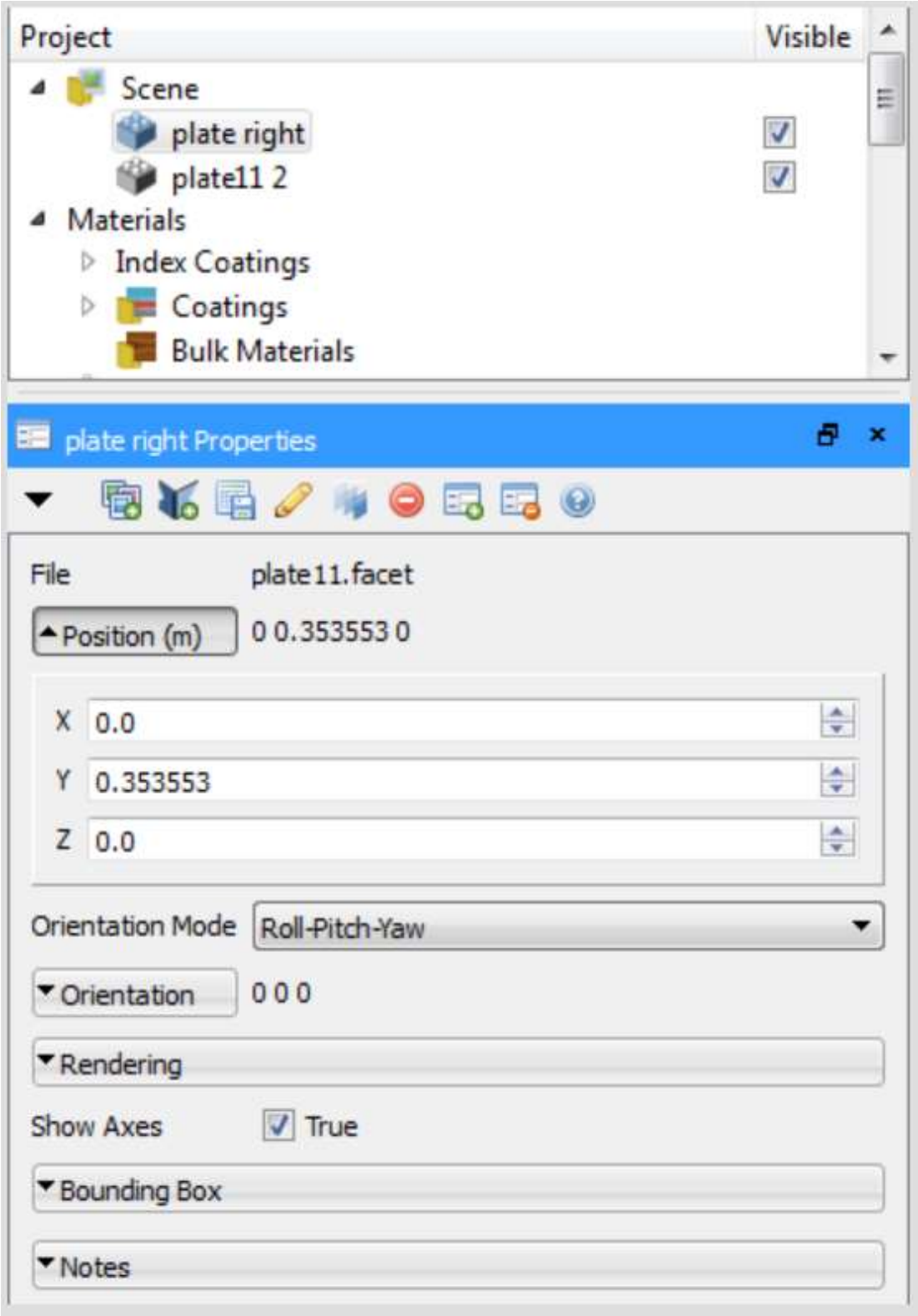


Рис. 5.6. Параметры платы и сдвиг её положения по оси Y

Выберите узел ***plate11 2*** переименуйте его в ***plate left***, используя операцию ***Rename*** в панели свойств (рис. 5.7).

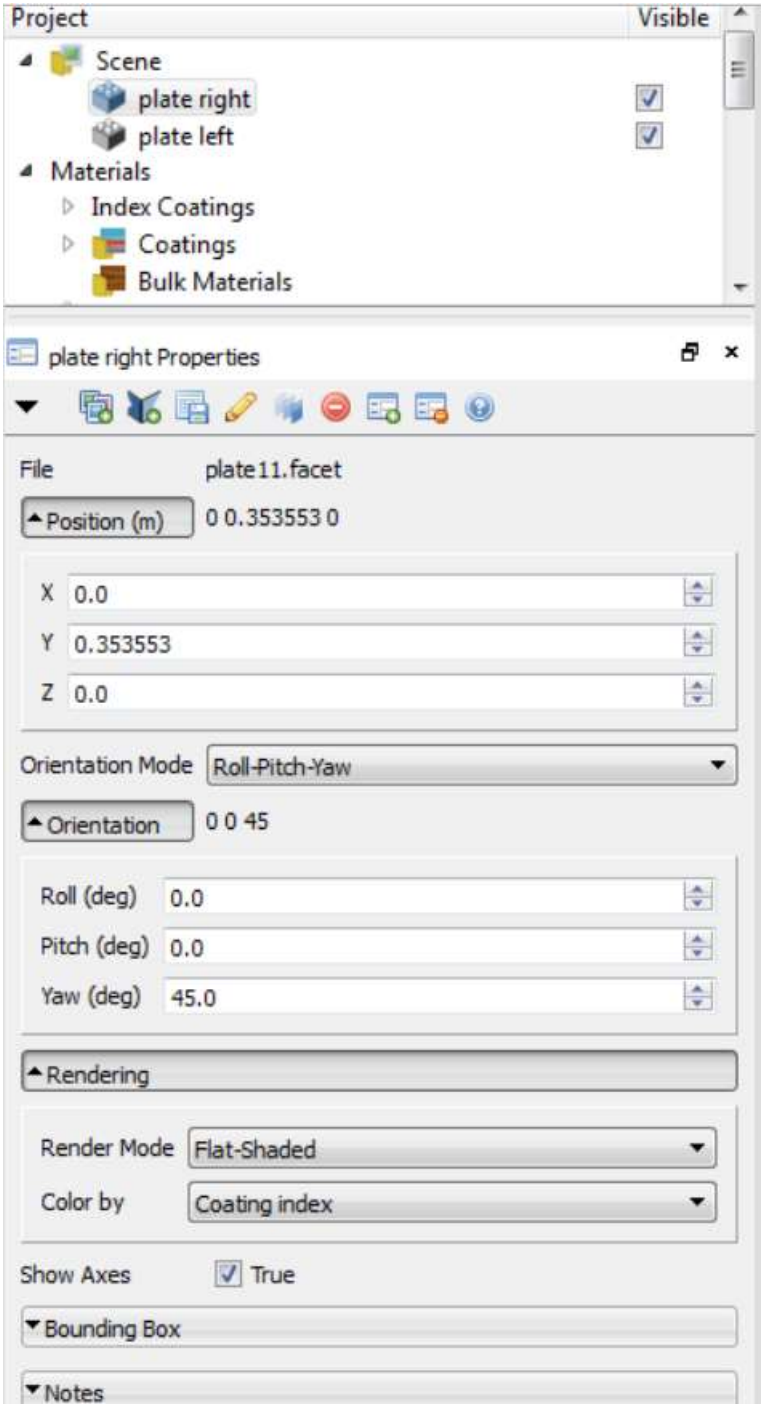


Рис. 5.7. Задание размеров и положения плоскости **plate right**

Разверните папку ***Position*** в панели узла и установите **Y** на значение -*0.353553* (рис. 5.7).

5.2.1 Изменение ориентации CAD моделей

Выберите узел ***plate right***. Разверните папку ***Orientation*** в узле свойств панели. Затем установите ***Yaw*** = *45*. Модель будет вращаться на 45 градусов.

Выберите узел ***plate left***. Разверните папку ***Orientation*** в панели свойств узле. Затем, установите ***Yaw*** = *-45*.

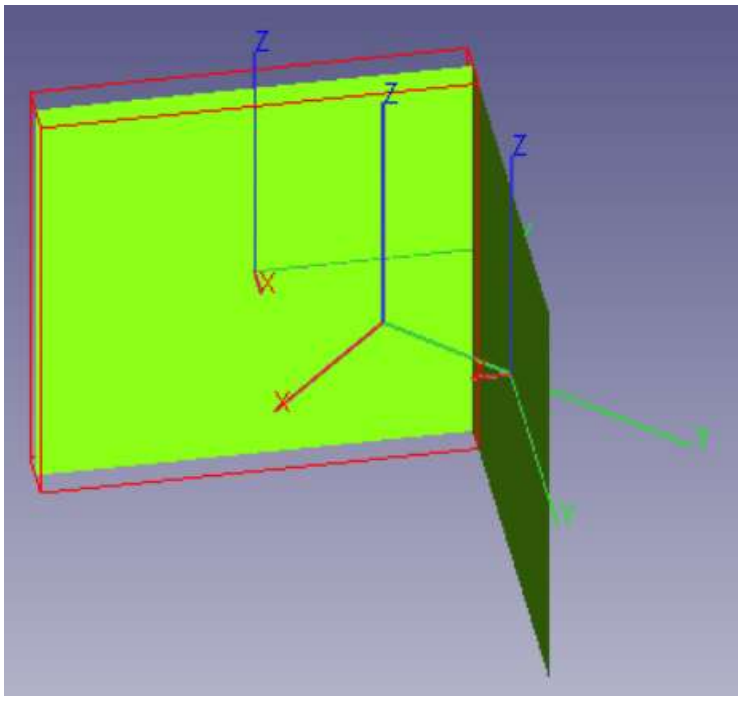


Рис. 5.8. Две смещенные и повернутые плоскости

Эти изменения приводят к созданию раздельной геометрии CAD. В примере мы уже знаем размер плоскости. Можно было бы вручную рассчитать верное количество сдвигов и вращений, необходимых для построения согласованной модели. Это не всегда возможно. Поэтому можно использовать инструмент ***automatic placement*** для автоматического размещения узлов CAD.

5.2.2 Установление индексации покрытий

Две *CAD* платы покрыты одинаковым материалом. Покажем, как добавить новое покрытие и назначить этот новый материал к поверхности.

Разверните узел ***Materials***; затем узел ***Index Coatings*** и затем все узлы внутри ***Coatings***. Можно видеть, что существует один индекс покрытия ***Coat Index 1*** и один материал в разделе ***Coatings: PEC***.

Эта первая группа содержит список всех различных индексов покрытия, а узел ***Coating Index*** определяет материал, присвоенный материалу, а также свойства покрытия ***Coating Index***.

Кликните правой кнопкой на ***Index Coatings*** и выберите ***Add Coating Index***.

Два новых узла ***Coating Index*** добавляются в сцене внизу ***Index Coatings*** и ***Coatings:PEC***. Узел **Coat Index 2** появляется со знаком предупреждения (рис. 5.9). Это показывает, что ***Coating Index*** не был описан для поверхности этого узла.

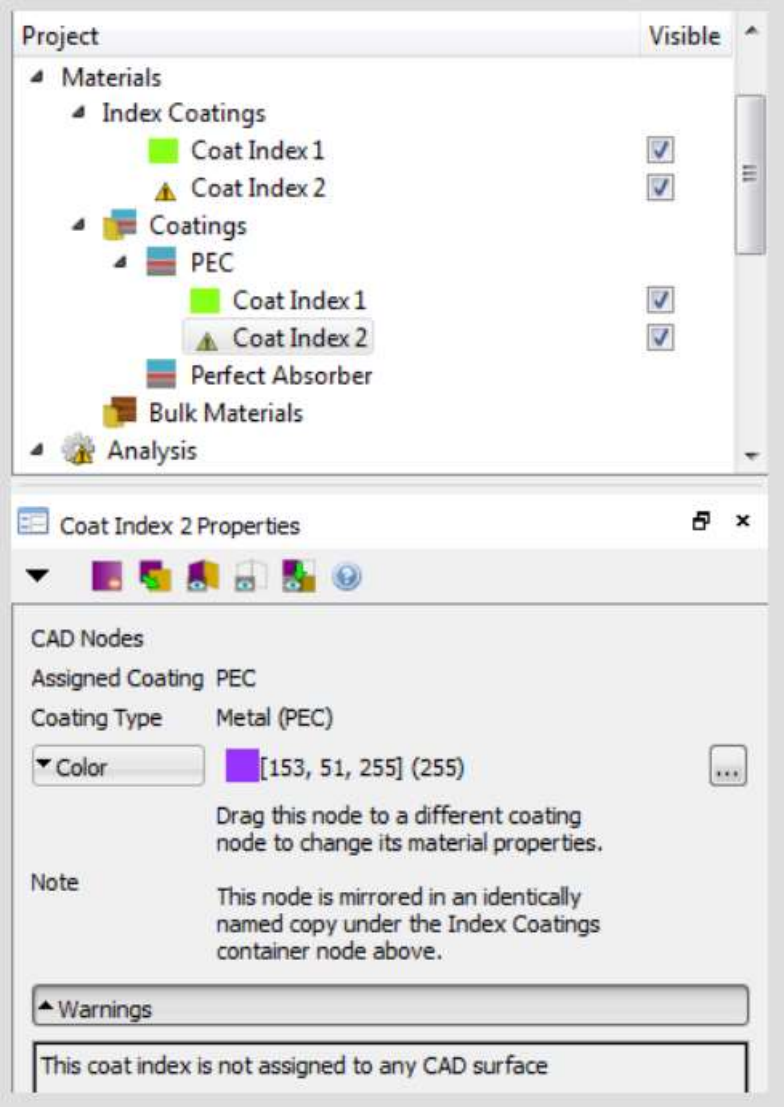


Рис. 5.9. Добавление нового индекса покрытия

Выберите ***Coatings*: *PEC: Coat Index 2***. Затем, удерживая ***Ctrl***, нажмите левую кнопку мыши и дважды кликните на поверхности плоскости ***Plate Right***. Это действие присваивает этой поверхности новый индекс покрытия. На выбранной поверхности изменяется цвет. Таким образом, покрытия можно различать по цвету. (Перетаскивание выполняется на окно видимых поверхностей). Цвета могут быть разные, но обе поверхности могут быть ***PEC*** (рис. 5.10).

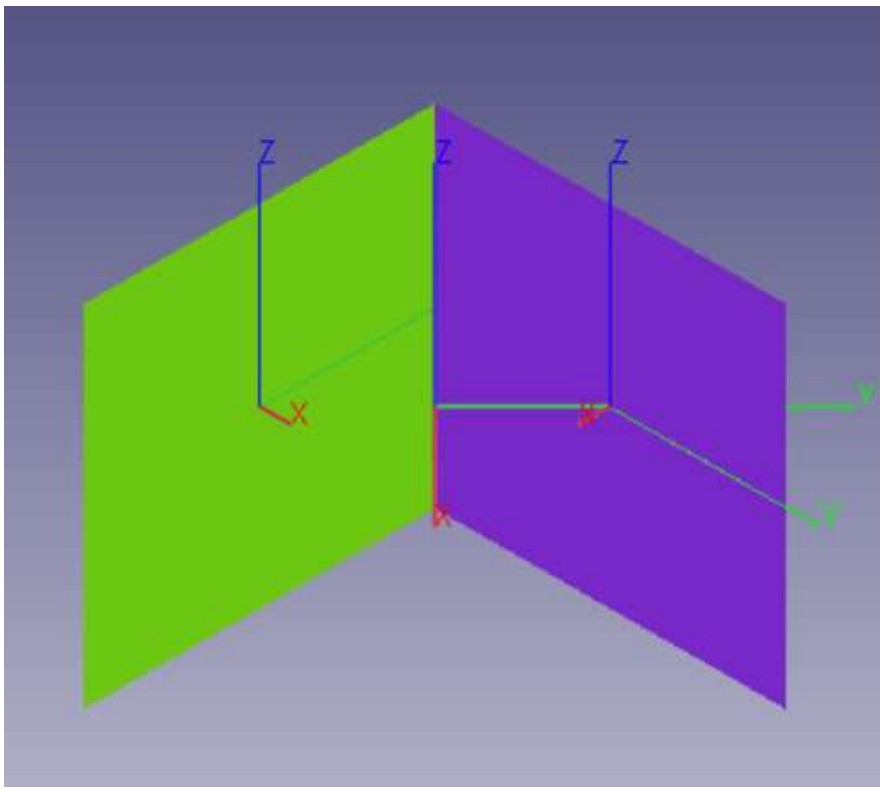


Рис. 5.10. Присваивание нового индекса покрытию плоскости

Теперь нажмите индекс покрытия и перетащите его, в 3D окно на материал ***PEC: Coat Index 2*** как ***Perfect Absorber***. Это изменяет свойство материала как ***Coating Index***. Правая плоскость снова становится ***Perfect Absorber***.

5.3 Группирование моделей CAD

В сцене может быть любое количество моделей CAD и антенн. Однако это может привести к путанице, если пользователь имеет большое количество моделей. Savant предоставляет способ группирования узлов и антенн с помощью узла **Scene Group** .

Кроме того, узлы, добавленные в эти узлы ***Scene Group***, имеют тот же локальный набор координат, что и контейнер группы. Это свойство полезно, если пользователь хочет изменить положение и ориентацию нескольких узлов одновременно.

Выберите действие ***Add Group*** в линейке меню. Новый узел ***Scene Group*** названный ***Group 1*** появится под ***Scene*** (рис. 5.11). Нажмите и перетащите модели ***plate right*** и ***plate left*** во вновь созданный узел ***Group 1***.

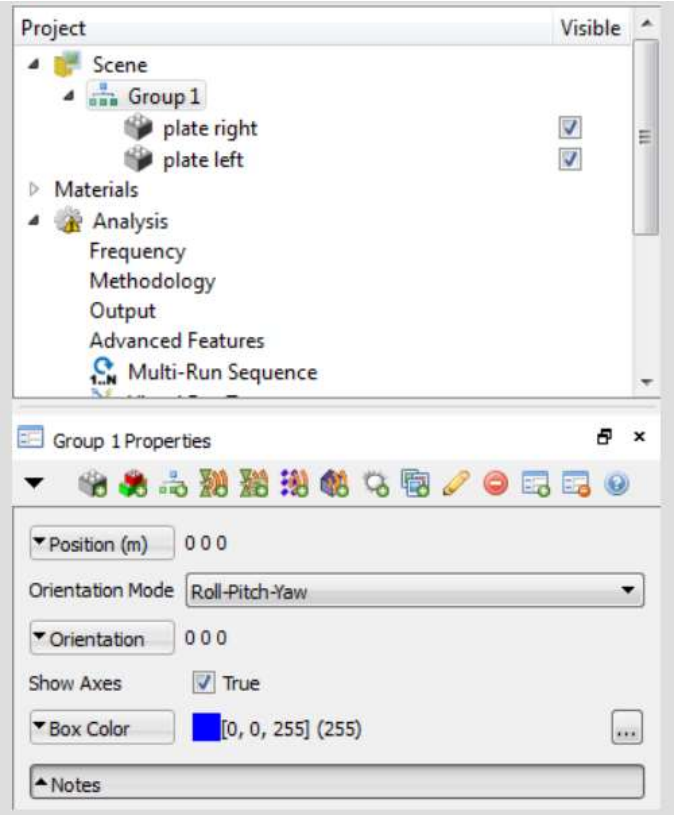


Рис. 5.11. Создание группы моделей

Установите ориентацию группы ***Orientation of Group 1*** на значения ***Roll***:*0*, ***Pitch***:*-45*, ***Yaw***:*0* и положение ***Position*** to *X:-1*

Обе модели CAD в группе сдвигаются и вращаются одновременно.

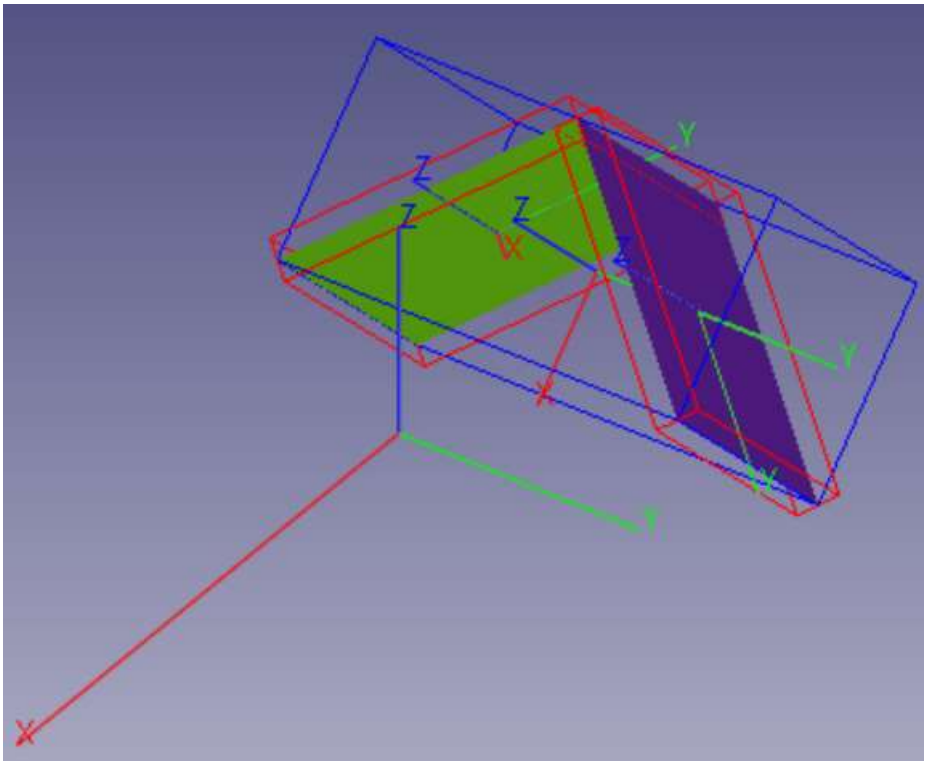


Рис. 5.12. Управление положением и ориентацией группы

Заметим, что узлы ***Position*** и ***Orientation*** внутри *CAD* модели не изменились (рис. 5.12). Они показаны относительно локального набора координат верхнего узла.

Нажмите и перетащите ***plate right*** назад в сцену ***Scene***. Величины для ***Position*** и ***Orientation*** подставляются в соответствии с началом глобальной системы координат ***origin***, определенной в ***Scene***.

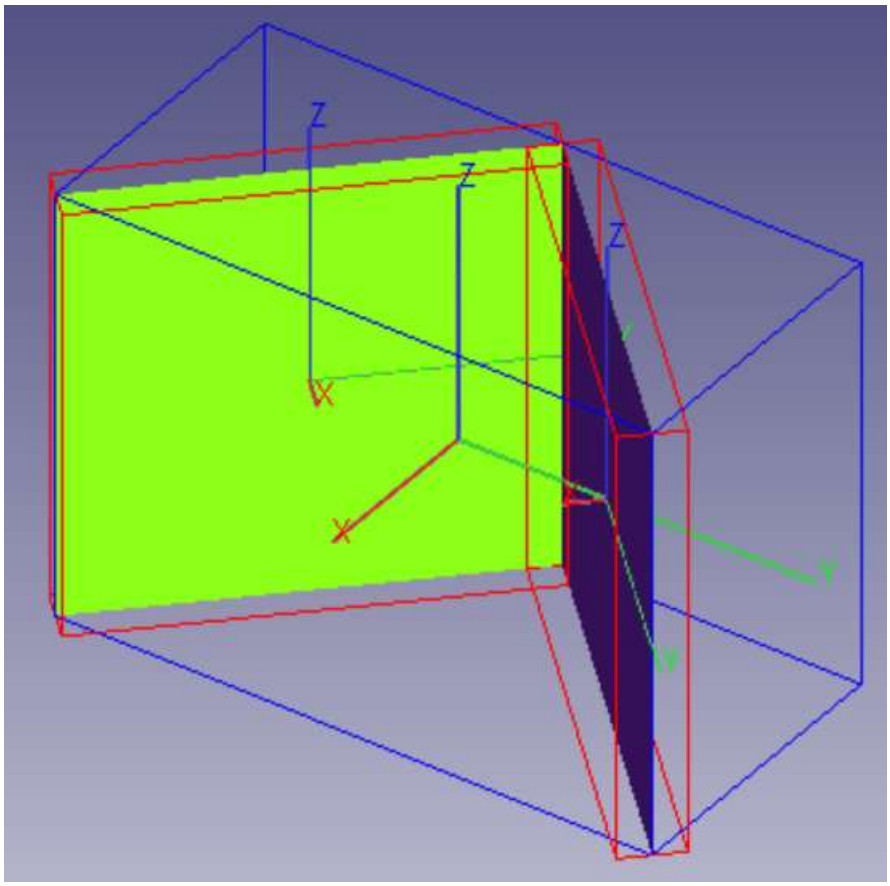


Рис. 5.13. Уголковый отражатель из двух пластин

Выделите и перетащите ***plate right*** обратно в группу ***Group 1***. Опции ***Position*** и ***Orientation*** снова переориентировались (рис. 5.13).

Измените величины в разделах ***Position*** и ***Orientation*** в ***Group 1*** обратно к 0 во всех различных полях. Это вернёт модель к исходному положению.

5.4 Добавление антенны к сцене

Выберите команду ***Add Antenna***. Установите вновь созданный узел ***Antenna Type*** на ***Short Dipole*** и переобозначьте узел на ***shdip*** (рис. 5.14).

Установите положение антенны ***Position*** на *X:0.2, Y:0 и Z:0*.

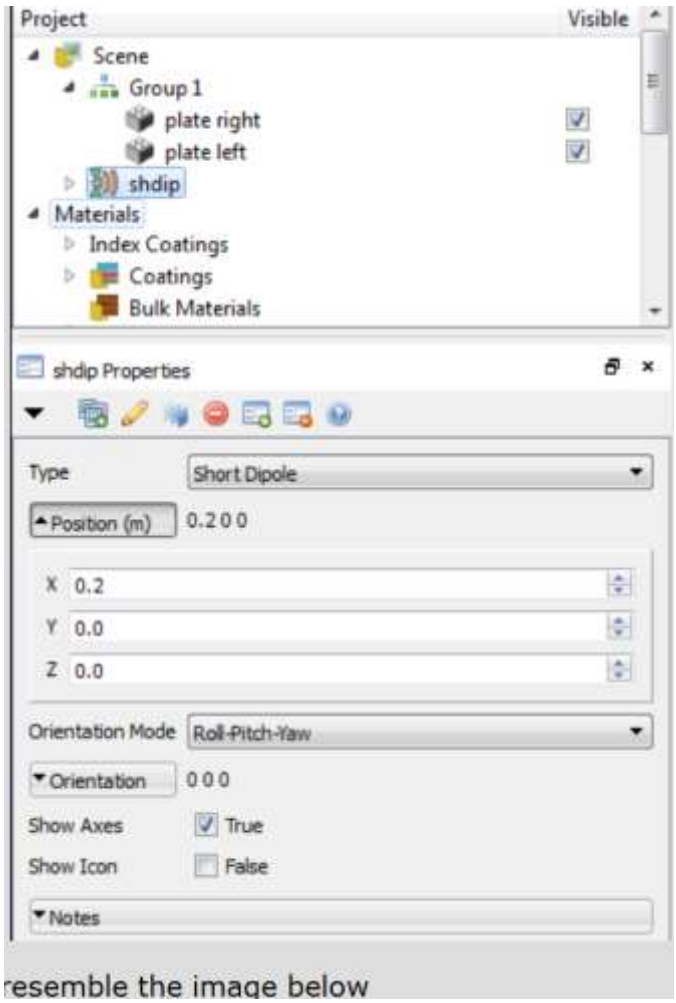


Рис. 5.14. Переименование антенны на shdir и сдвиг её на X=0.2 м

Выберите тип антенны как полуволновый диполь (***Half-wave Dipole***). Он имеет ДН, показанную на рис. 5.15.

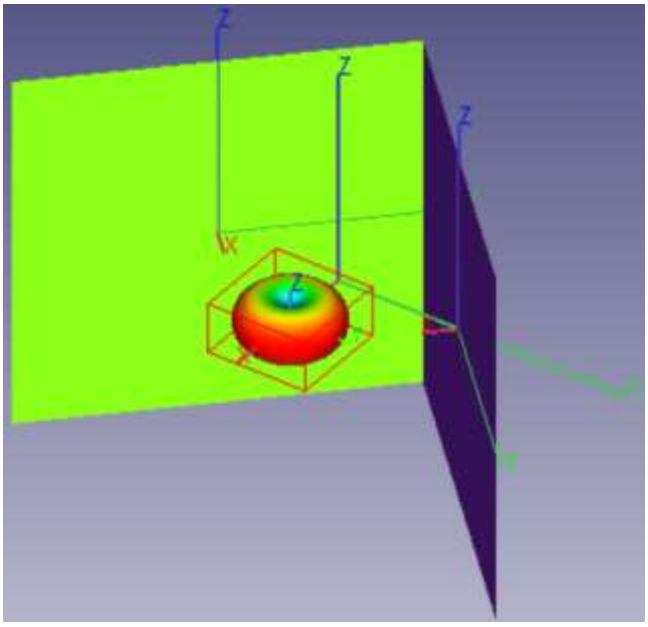


Рис. 5.15. Сдвиг антенны в пространстве

5.5 Запуск и просмотр лучей

Выберите узел ***Visual Ray Trace***. Установите ***Max Frequency*** = *0.271* GHz и ***Launch From*** на ***Custom***. Установите точку запуска лучей на *X:0.2, Y:0.0* и *Z:0.0* (рис. 3.16).

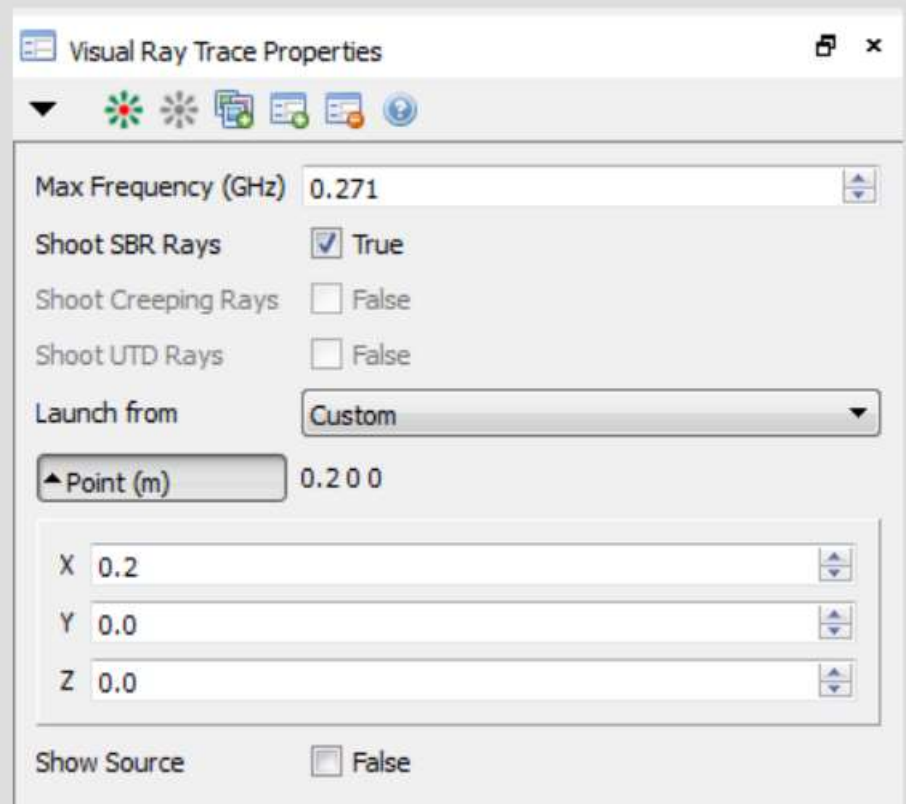


Рис. 5.16.Установка точки запуска лучей

Запустите лучи командой ***Shoot Rays***. Можно видеть, как лучи достигают поверхностей обоих пластин (рис. 5.17).

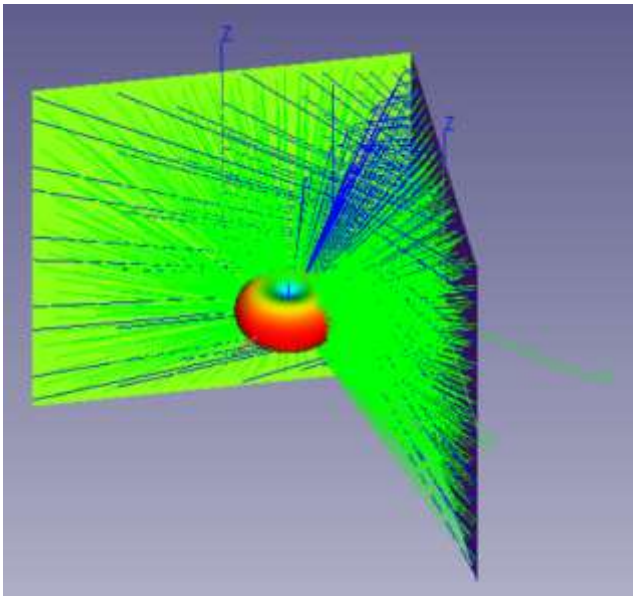


Рис. 5.17. Падение лучей от антенны на обе плоскости

Чтобы снять видимость лучей, выберите команду ***Clear Rays***.

5.6 Установка и запуск моделирования, вывод и показ результатов

В данном примере описаны параметры, которые необходимо установить, чтобы инициировать моделирование, сохранить результаты, перенастроить проект, получить новые результаты, а затем показать и сравнить несколько результатов расчета.

В узле ***Analysis*** установите тип анализа ***Analysis Type*** как ***Far-field pattern*** и ***Tx Antenna*** как ***shdip***.

Выберите узел ***Far-Field,*** установите ***Far-field Type*** на ***Azimuth cut*** и ***Azimuth Range*** как ***Start***:*-180*, ***Stop***:*180*, ***Step***: *180*.

Выберите узел ***Frequency*** и установите ***Frequency*** = *0.271* GHz

Выберите узел ***Methodology***, установите ***Ray Density*** = *16* и ***Max Number of Bounces*** = *5*.

Выберите ***Run*** для начала моделирования.

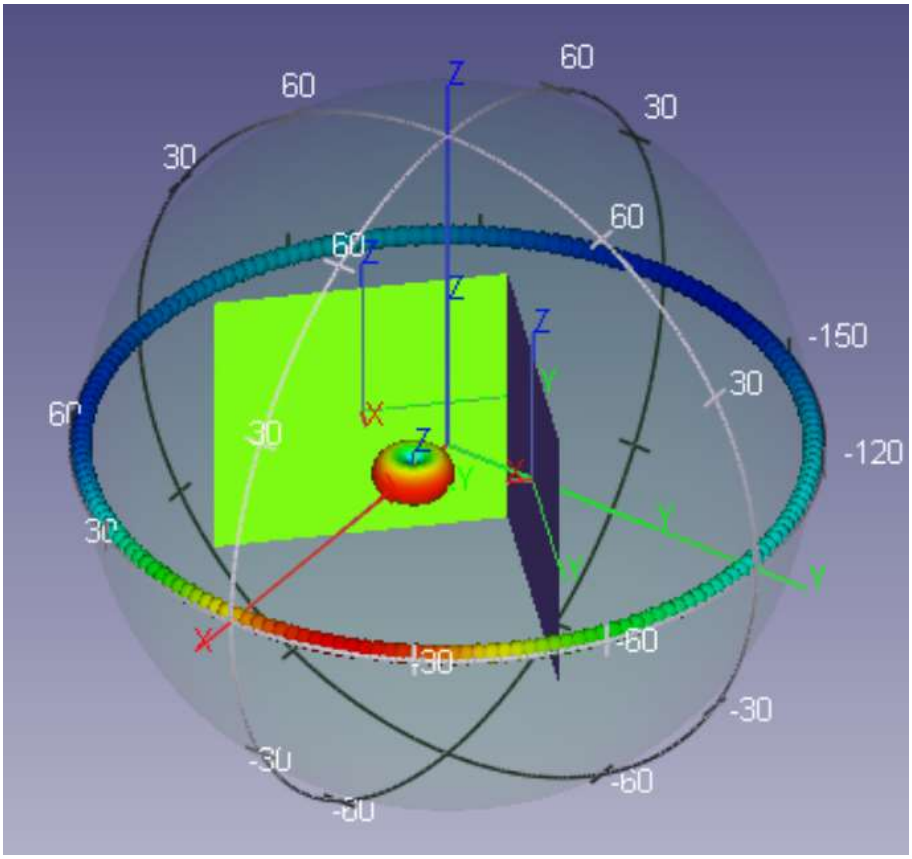


Рис. 5.18. Антенна на созданной платформе

После выполнения расчета, выберите узел ***Results: Far-Field*** и кликните действие ***Keep Result***.

После того, как действие будет выполнено, узел результатов переименовывается на ***Kept Far-Field 1*** (рис. 5.19) и окно ***3D -Scene***

возвращается в исходное состояние, которое существовало до того, как проект был запущен. Результаты были сохранены в проекте. Если проект будет сохранен, результаты будут сохранены вместе с конфигурацией проекта.

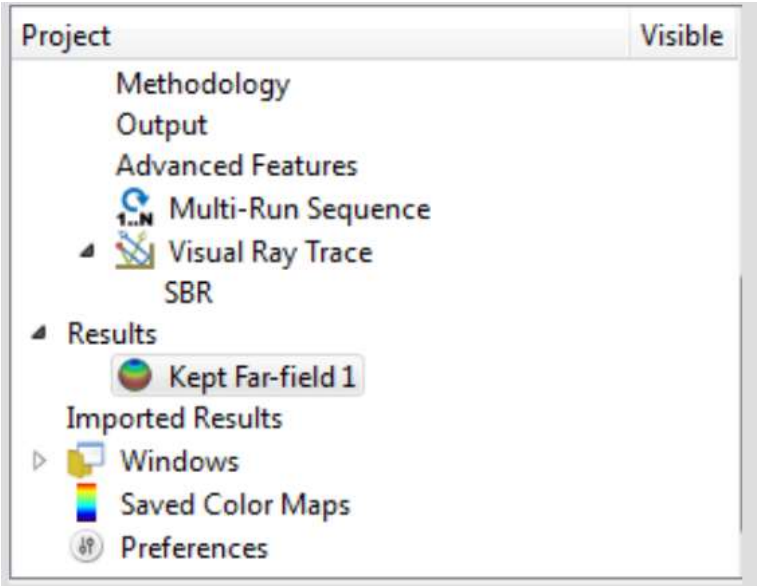


Рис.5.19. Сохранение результатов расчета дальнего поля

Сохраненные результаты можно повторно увидеть в сцене, перетащив значок узла Results обратно в 3D-окно и отключить видимость узла дальнего поля. Выберите узел результатов ***Kept Far-Field 1*** и переименуйте его как ***PEC-Absorber***.

5.6.1 Модификация сценария и перезапуск на расчет

Перетащите и наложите узел ***Coat Index 2*** от ***Perfect Absorber*** обратно в ***PEC***.

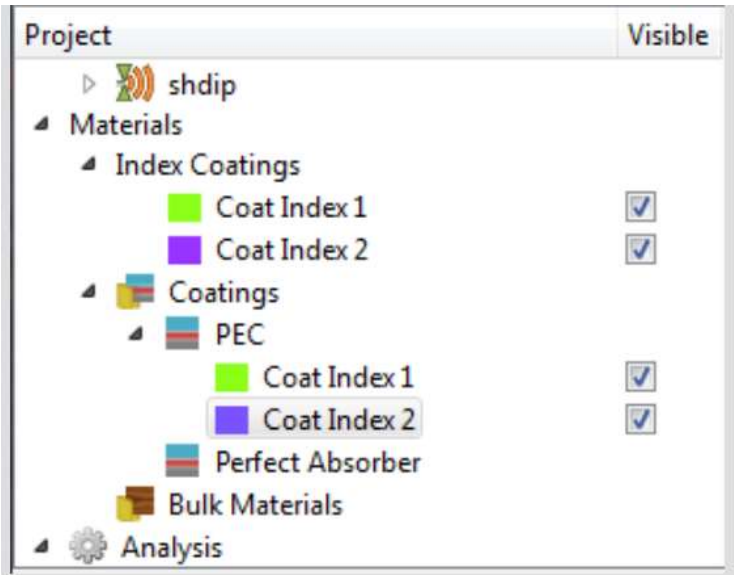


Рис. 5.20. Перевод второго покрытия обратно в PEC

Выберите ***Run*** для запуска расчета. Выберите узел ***Results: Far-Field*** и кликните действие ***Keep Result***. Переименуйте узел в ***PEC-PEC***.

5.6.2 Нанесение результатов расчета

Дважды кликните узел ***Results: PEC-PEC,*** чтобы открыть окно результатов. Нажмите и перетащите узел ***PEC-Absorber*** в окно графиков (рис. 5.21).

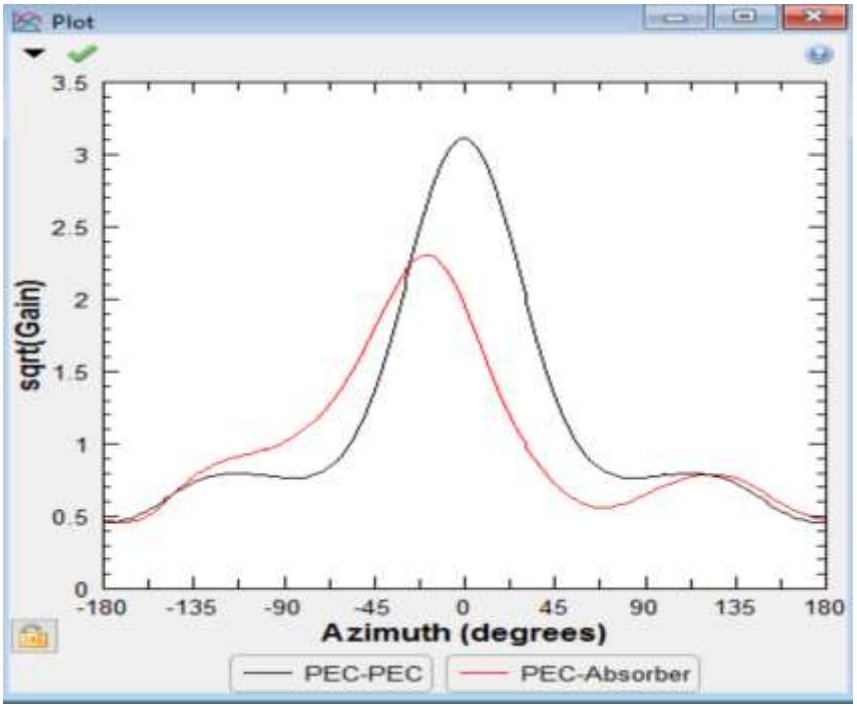


Рис. 5.21. ДН отражения системы в случае идеального отражения поверхности (черный) и с включением поглотителя (красный)

Видим, что в конфигурации ***PEC-PEC***, максимум достигается при ***Azimuth*** = 0. В конфигурации ***PEC-Perfect Absorber***, максимум меньше и сдвинут к ***Azimuth*** ~= -18°.

Сохраните проект как ***Tutorial3_1.savant***.

5.7 Добавление в проект модели самолета

Создайте новый проект командой **New Project**. В главном меню *Savant*, кликните кнопку ***Add CAD*** и загрузите в проект следующие файлы:

- *engine_port.facet;*
- *engine_starboard.facet;*
- *rotor_blade_port.facet;*

- *rotor_blade_starboard.facet;*
- *V22-Osprey_main_body.facet*.

Кликните ***Open*** при выборе файлов. Savant позволяет загружать несколько моделей одновременно.

Диалог ***Scale CAD model on import*** появится снова для каждой модели. Кликните ***Cancel*** для каждого случая для разрешения.

После загрузки узла ***V22-Osprey_main_body*** CAD, будет предупреждение относительно поверхности с высоким аспектом изменения конфигурации и дублированными поверхностями. Эти предупреждения можно игнорировать. Итак, модели будут загружены и появятся в сцене со следующими координатами:

- *V22-Osprey_main_body*: Position: (0.0 ,0.0, 0.0);
- *engine_port*: Position: (X,Y,Z) = (0.431504 ,6.500000, 0.753832) m;
- *engine_starboard*: Position: (0.431504 ,Y:-6.500000, 0.753832) m;
- *rotor_blade_port*: Position: (1.669208, 6.970000, 0.935231) m;
- *rotor_blade_starboard*: Position: (1.669208 ,-6.970000, 0.935231) m.

Теперь можно видеть модель самолета с моторами и винтами (рис. 5.22).

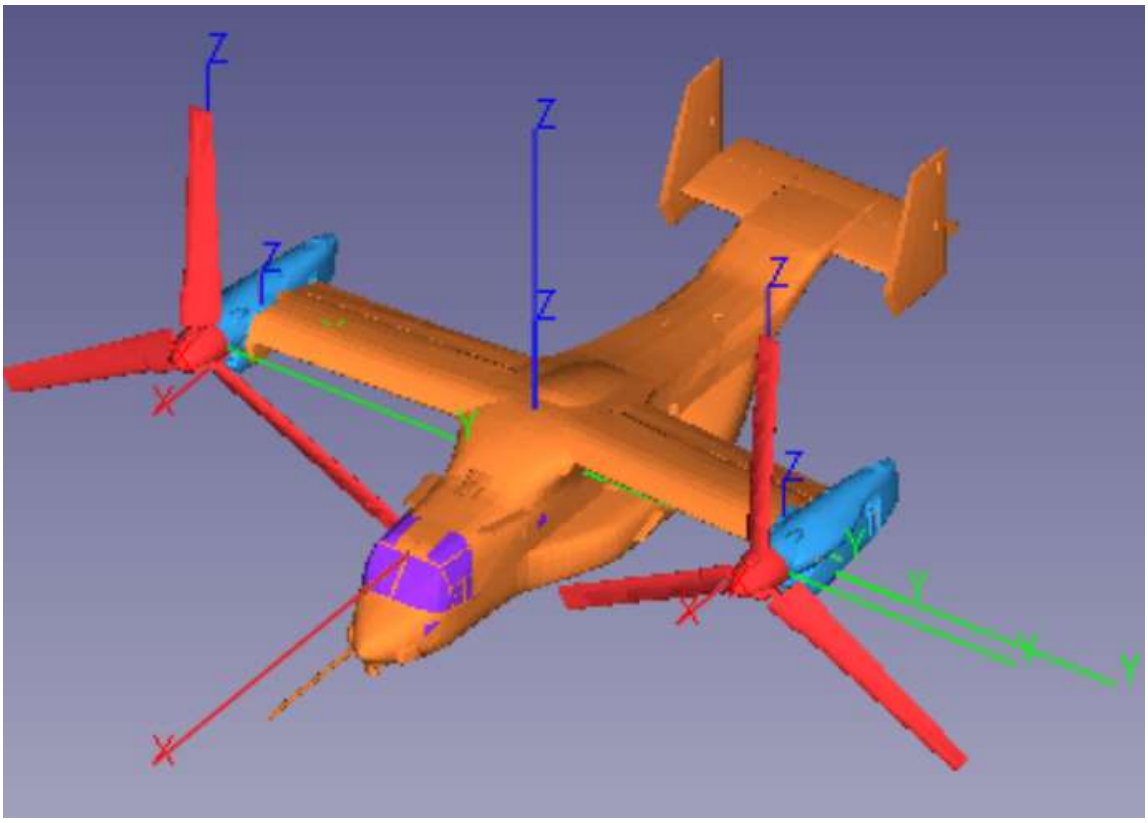


Рис. 5.22. Модель самолета с винтами

Сохраните проект в директории ***Tutorial3*** как ***Tutorial3_2.savant.***

5.8 Группировка моделей CAD и добавление антенны к сцене

5.8.1 Группировка CAD моделей

В главном меню *Savant*, кликните кнопку ***Add Group***. Выберите вновь созданный узел и переименуйте его в ***Engines and Rotors***. В инструментальной линейке выше панели свойств ***Engines and Rotors*** (внизу **Scene**), кликните кнопку ***Add Group***.

Переименуйте этот новый узел ***Scene Group*** на ***Starboard***.

Выберите узел ***Engines and Rotors*** и затем кликните кнопку ***Add Group*** снова сверху панели их свойств и переименуйте новый узел ***Scene Group*** на ***Port***. Нажмите и перетащите узлы моделей ***CAD*** так, чтобы они расположились в сцене проекта как показано на рис. 5.23.

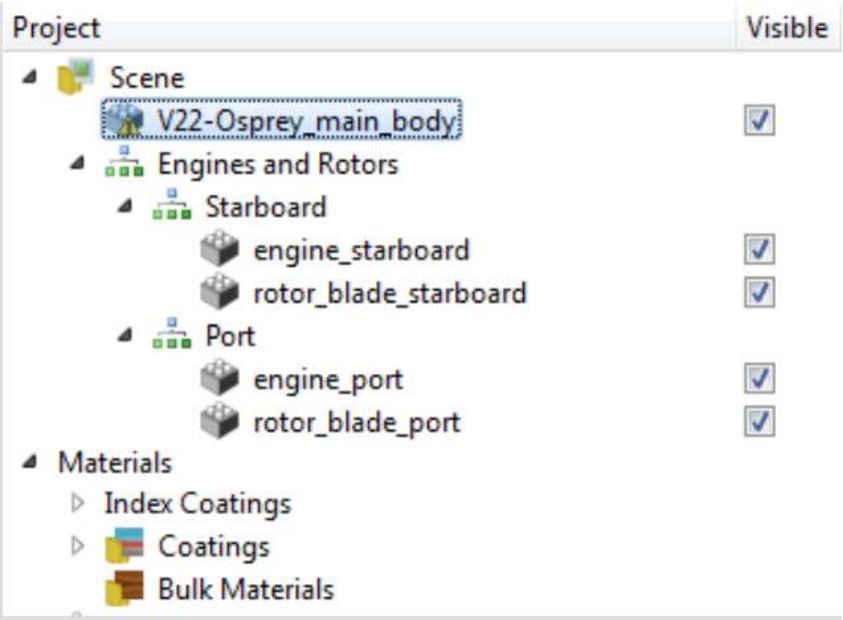


Рис. 5.23. Разделение составляющих самолета по группам

5.8.2 Добавление антенны в модель

В меню Savant, кликните кнопку ***Add Antenna***. Новый узел ***Antenna*** будет создан в дереве проекта под именем ***Antenna 1***. В панели свойств узла ***Antenna 1***, установите ***Type*** как ***Wire Monopole*** и представление антенны (Antenna Representation) как ***Current Sources***.

Установите ***Resonant Frequency*** антенны равной *10* GHz. Это не устанавливает частоту моделирования, а только расчетную частоту

монопольной антенны. После этого его можно смоделировать на любой частоте, хотя в этом примере мы смоделируем его на проектной частоте 10 ГГц.

На следующем шаге будем использовать инструмент ***Place Object Tangent to Surface*** чтобы разместить антенну вблизи точки (белого шарика) показанной на рис. 5.24.

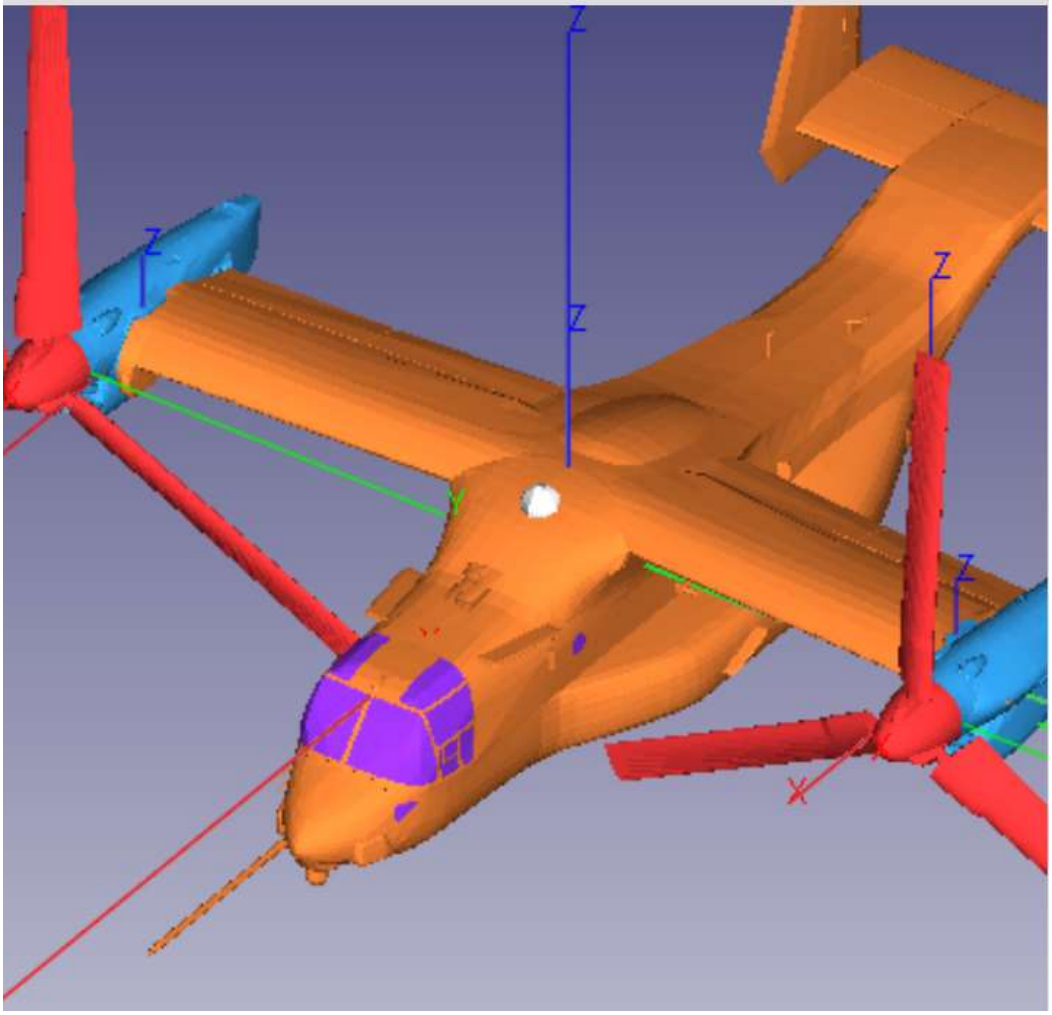


Рис. 5.24. Установка антенны в выбранной точке

Выберите узел ***Antenna 1***. Кликните кнопку ***Place Object Tangent to Surface*** на инструментальной линейке в окне ***3D-Scene***. В окне ***3D-Scene***, сдвиньте курсор к месту на ***V-22*** показанному белым шаром на верхнем рисунке.

Нажмите и удерживайте клавишу ***Ctrl*** и затем нажмите левую кнопку мыши. Это расположит антенну на точке положения курсора и на поверхности ***V-22*** в указанной точке. Сделайте увеличение монопольной антенны так, чтобы источники тока были ясно видны (рис. 5.25).

В узле ***Antenna***, включите ***Show Relative Coordinates,*** если она еще не включена. Разверните папку ***Relative Position***.

Изменяйте координату Z на 1 mm (0.001 m), пока база видимой квадратной земляной плоскости не станет длиннее размера модели ***V-22***, но не выше, чем его самого.

Эта тонкая настройка типична после интерактивного размещения антенн с заземлением, таких как монополь, которые используют плату в качестве своей реальной земляной плоскости. Если разместить антенну слишком низко, существует опасность того, что один из источников тока будет находиться под поверхностью размещения, что приведет к попаданию лучей в ловушку и неверным результатам моделирования. Размещение антенны чуть выше поверхности нормально, но не нужно, чтобы дополнительная высота превышала $\lambda/20$, так как в противном случае источники антенны не будут правильно установлены на металлическую поверхность (рис. 5.25).

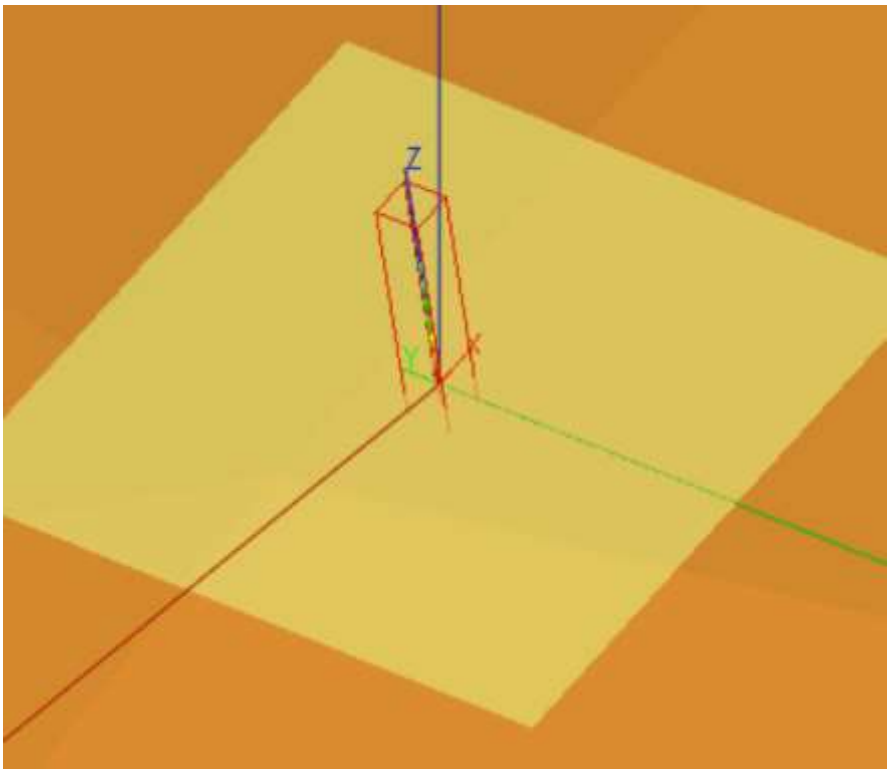


Рис. 5.25. Источники тока антенны над подложкой

Чтобы согласовать объекты, антенна должна быть размещена в глобальных координатах как

- X = 0.678179 m;
- Y = 0.003198 m;
- Z = 0.979346 m.

с ориентацией

- ***Roll*** = 0.0 deg;
- ***Pitch*** = -11.242464 deg;

- ***Yaw*** = -180.0 deg.

Для согласования этих координат, выполните следующие шаги.

Выберите узел ***Antenna 1*** и отключите ***Show Relative Coordinates***. Введите координаты ***Position*** и ***Orientation*** заданные сверху. Вы можете установить визуализацию узлов ***Pattern*** и ***Current Source*** наиболее подходящей для вас. На рисунках, показанных в примерах, они невидимы. Сохраните проект.

5.9 Запуск на расчет и сравнение результатов

Выберите узел ***Analysis***. Установите ***Analysis Type*** на ***Far-Field pattern*** и ***Tx Antenna*** **на** ***Antenna 1***.

Выберите узел ***Far-Field***. Сконфигурируйте этот узел, чтобы он имел следующие опции:

- ***Far-field Type*** = ***Azimuth Cut;***
- ***Azimuth Range***: ***Start*** = -180, ***Stop*** = 180, число углов = 360;
- ***Phase Center*** = ***Tx Origin.***

Выберите узел ***Frequency*** и установите ***Frequency = 10*** **GHz.**

Выберите узел ***Methodology***. Установите ***Ray Density =*** *1* и ***Max Number of Bounces =5.***

Установите узел ***Windows***: ***3D-Scene***: ***Far-Field*** невидимым, отключая режим ***Visible*** в дереве проекта.

5.9.1 Запуск лучей

Выберите узел ***Visual Ray Trace***.

Установите ***Max.Frequency*** равным *10* GHz.

Установите ***Launch From*** как ***Transmitter***. Установите ***Launch from Tx*** к фазовому центру ***Phase Center***. Установите ***Launch from Tx Phase-Center*** = *1*. Кликните ***Shoot Rays***.

Сцена ***3D-Scene*** будет показана вместе монопольной антенной и платформой (рис. 5.26, 5.27).

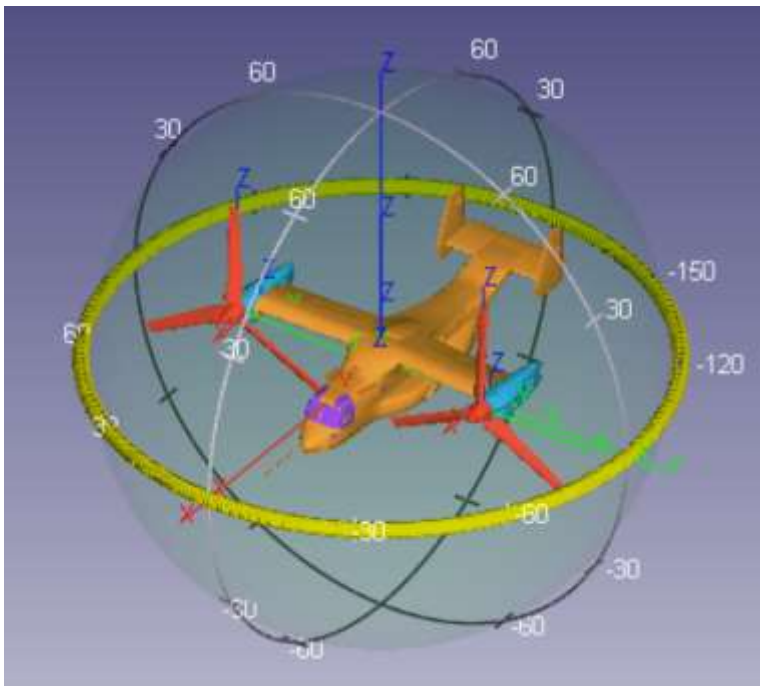


Рис. 5.26. Сцена самолет с антенной и окружностями шаров,
в который считается ДН

Выберите узел ***Engines And Rotors***. Несколько узлов CAD моделей и узлов ***Scene Group*** будет высвечены с лучами связи в окне ***3D-Scene***.

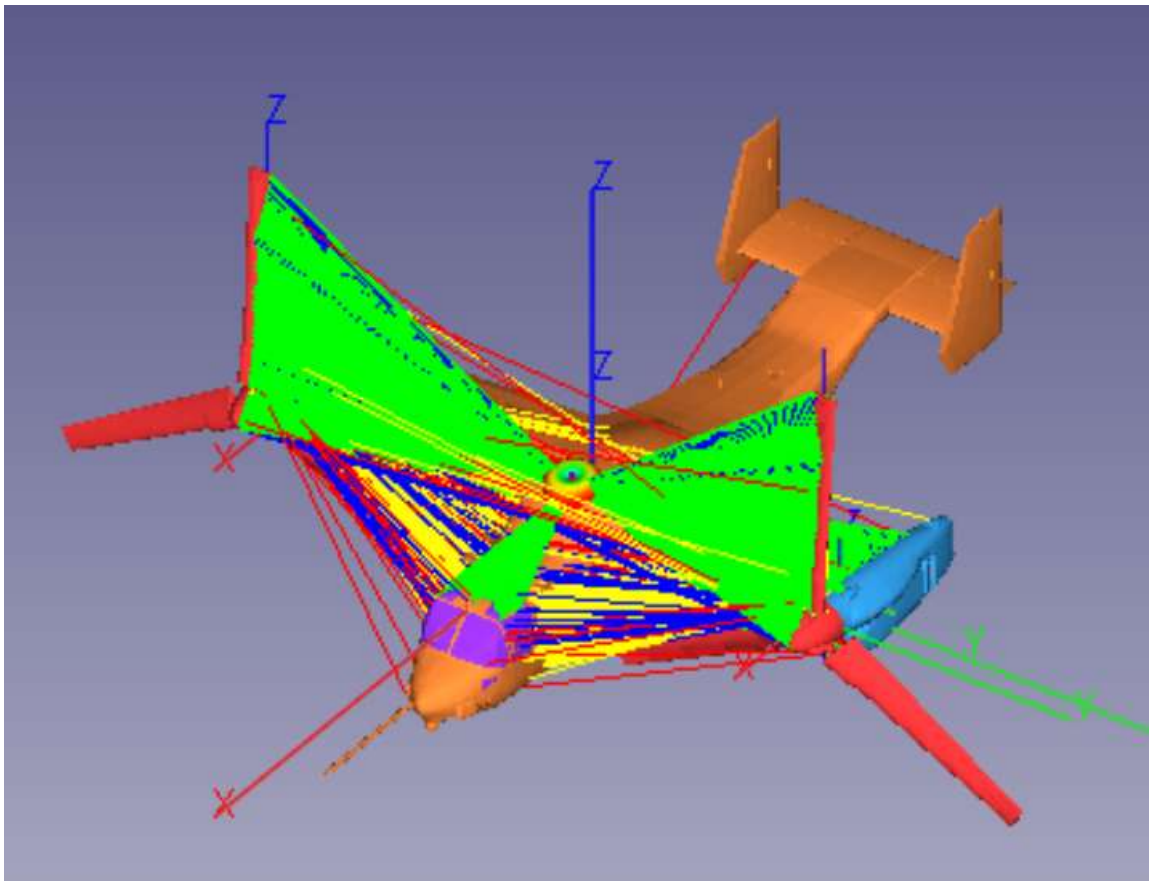


Рис. 5.27. Лучи радиоволн, излучаемые от антенны
и отражаемые от корпуса самолета

Очистите лучи (***Clear Rays***). Установите ориентацию ***Engines And Rotors*** в узле ***Orientation***: как ***Roll***: *0*, ***Pitch***: *90*, ***Yaw***: *0*.

Наблюдайте, как двигатели и пропеллеры проворачиваются в результате изменения этих параметров. Можно экспериментировать с другими подстройками в узлах CAD модели и узле **Scene Group** под ***Scene***. Например, при вращении узла ***Port*** , двигатель и ротор двигателя вращаются; при вращении узла ***rotor_blade_port*** будет просто крутиться сам ротор (рис. 5.28).

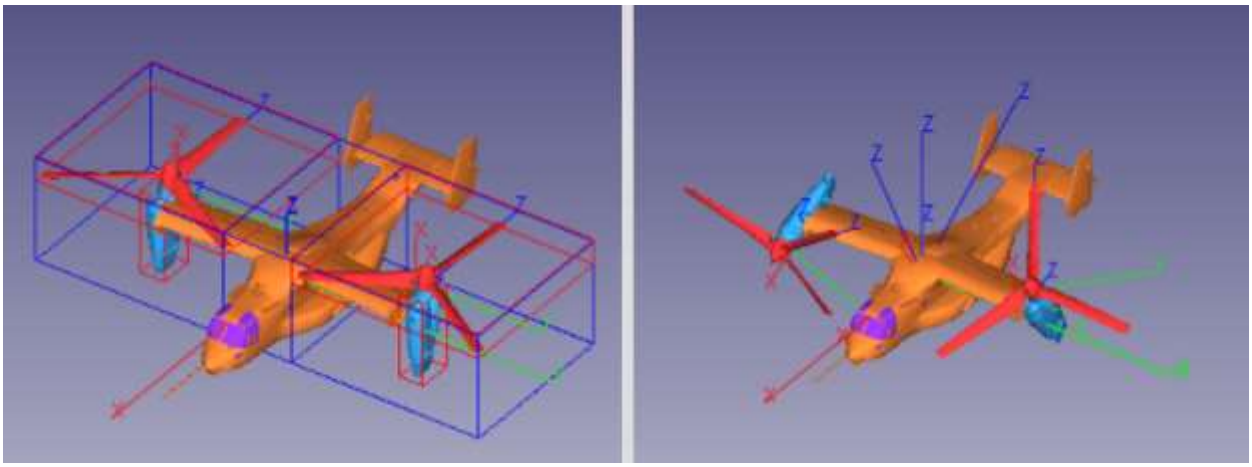


Рис. 5.28. Вращение положения моторов на самолете

Кликните ***Shoot Rays***. Трассы лучей изменяются в соответствии с изменением углов вращения мотора и винтов (рис. 5.29).

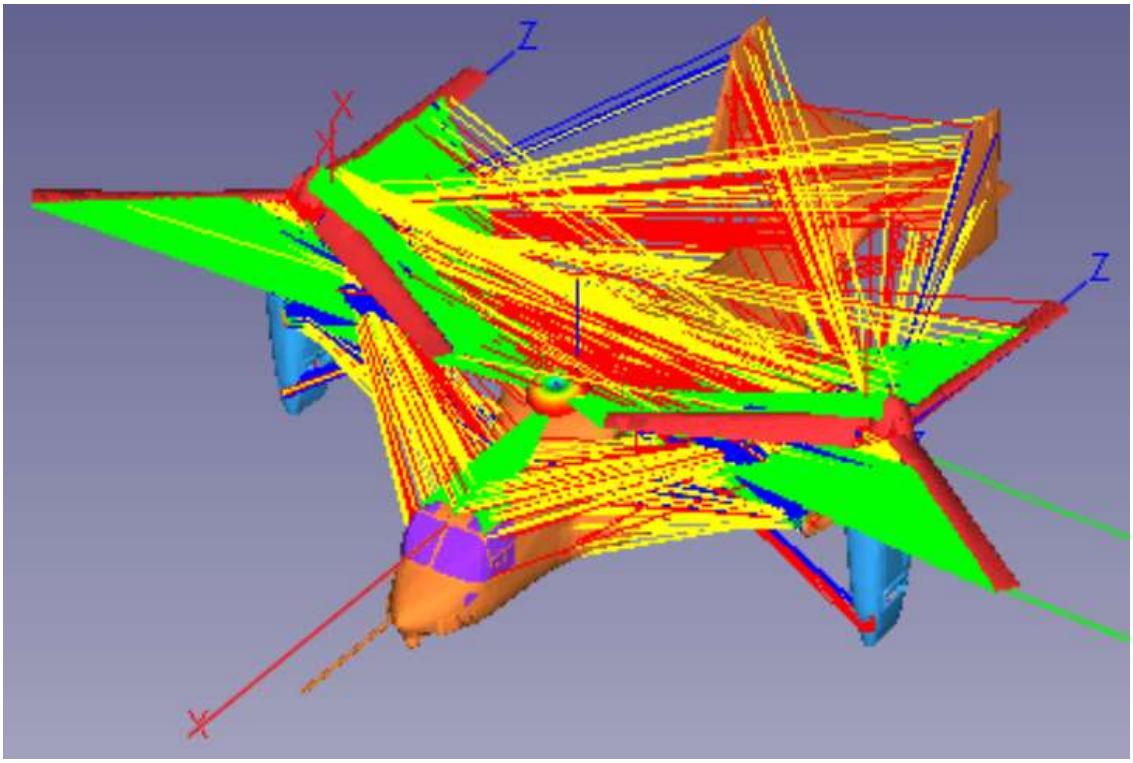


Рис. 5.29. Лучи идущие от антенны к точкам отражения поверхности

5.9.2 Результаты моделирования

Включите видимость ***Windows: 3D - Scene: Far-Field*** (рис. 5.30). Запустите моделирование.

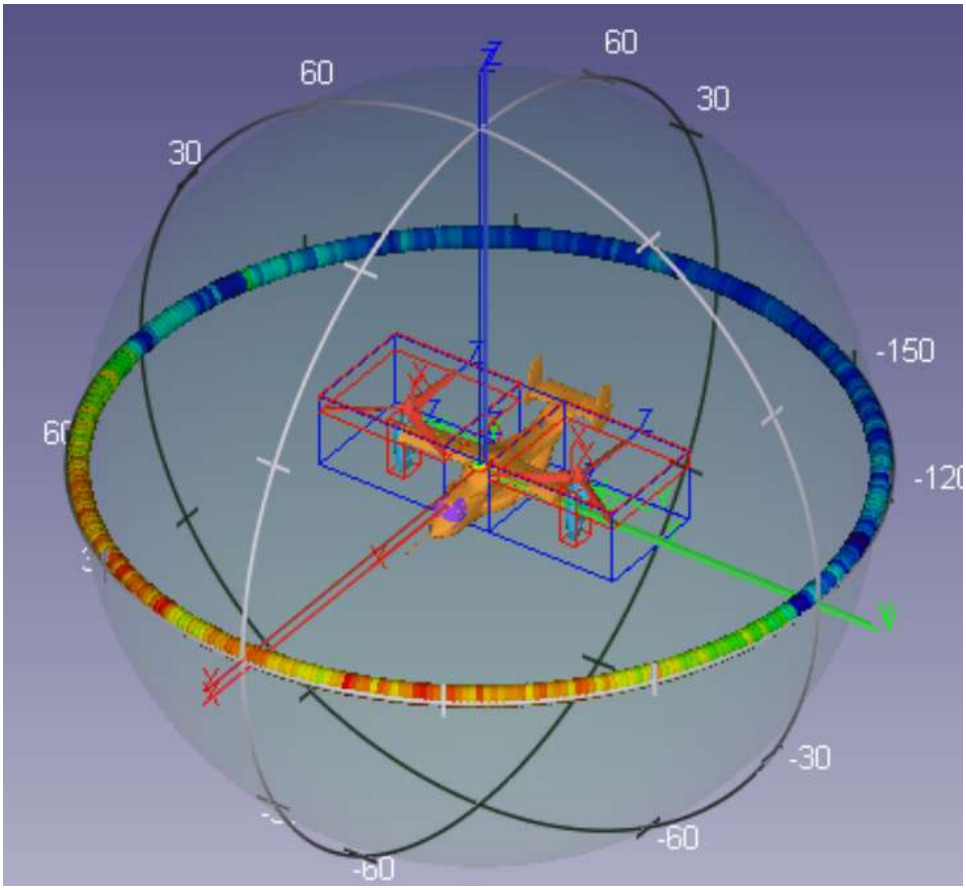


Рис. 5.30. Вывод вида ДН на меридиональную плоскость

Выберите узел ***Results: Far-Field*** и кликните действие ***Keep Result***. Переименуйте узел результатов на ***Engines-90 Deg-Rot***.

Верните узел ***Engines And Rotors*** обратно к положению ***Roll***: *0*, ***Pitch***: *0* *и* ***Yaw***: *0*.

Запустите расчет. Выберите узел ***Results: Far-Field*** и кликните действие ***Keep Result.*** Переименуйте узел результатов на ***Engines-NoRot***.

Сохраните проект.

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Results:Engines-NoRot*** и выберите ***Polar Plot***.

Нажмите и протащите узел ***Results:Engines-90Deg-Rot*** в окно ***Polar Plot***. Выберите узел ***Polar Plot***. Включите опцию ***Display CAD Overlay***. Измените ***Overlay Size (% of Plot)*** до величины около 70%. Выберите узел ***Total Composite-pol*** под узлом ***Polar Plot***. Установите ***Scale = Decibel***.

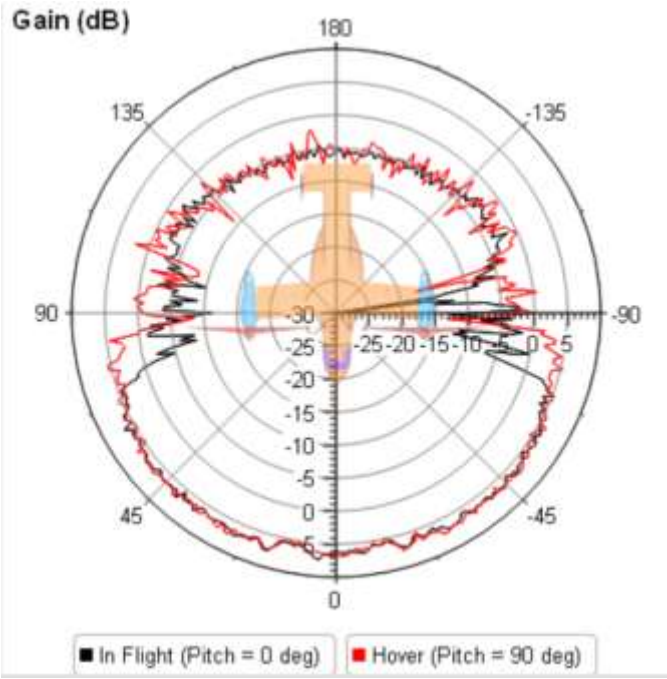


Рис. 5.31. Влияние роторов и двигателей на ДН является наибольшим вблизи углов ***Azimuth*** = +/- 90°, как и ожидалось.

Включите ***Custom Legend***, разверните ее, и установите в поле ***Name*** как ***In Flight (Pitch = 0 deg)***. Далее введите легенду для ***Total Composite-pol 2*** в виде ***Hover (Pitch = 90 deg)*** (рис. 5.31).

6 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛУЧЕЙ В МАТЕРИАЛАХ

В этом разделе используются понятия неметаллических материалов и выполняется расчет ближнего поля в пространстве. Сверху самолета находится диэлектрический корпус, в котором находится вращающаяся в азимутальной плоскости рупорная антенна (рис. 6.1).

Пользователь задает свойства материала и заполняет им пространство, окружающее рупорную антенну. Программа *Savant* вычисляет электрические и магнитные поля в сечениях этого пространства. Затем выполняется визуальная трассировка лучей, чтобы наблюдать взаимодействие ***SBR*** лучей с обтекателем антенны.

Содержание примера:

-Настройка покрытий материалов на поверхностях моделей;

-Расчет поля в пространстве;

- Трассировка лучей и фильтрация лучей.

Шаги этого примера:

1. Загрузка области расчета поля CAD модели.
2. Задание свойств материалов анализируемого пространства.
3. Загрузка ДН рупорной антенны.
4. Определение сетки точек пространственного наблюдения.
5. Выбор метода расчета частот.
6. Запуск на расчет и наблюдение процесса расчета.
7. Просмотр распределения лучей и применение фильтров лучей.
8. Применение плоскости сечения для рассмотрения пространства и поля внутри объектов (рис. 6.1).

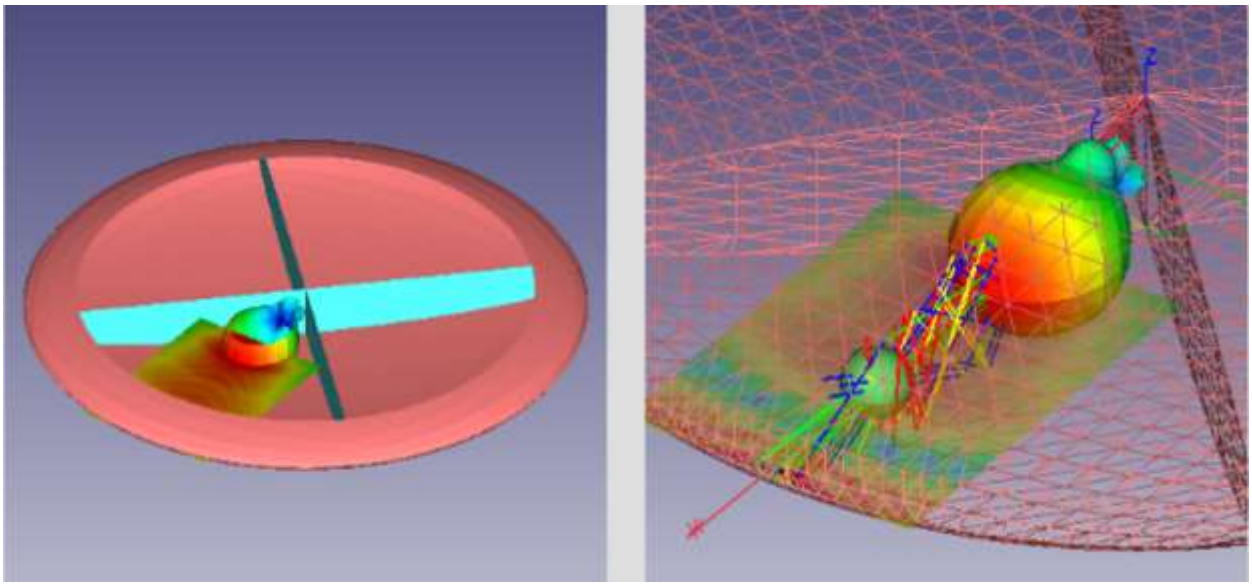


Рис.6.1. Излучение рупорной антенны в азимутальной плоскости.

а) пространство анализа, б) рассчитанное ближнее поле.

Пространство анализа в данном случае имеет изогнутые поверхности. В методе ***SBRt*** скорости расходимости лучей, отражающихся от изогнутых поверхностей, регулируются в соответствии с кривизной поверхности для поддержания правильной формы и уровня поля в лучевых трубках. Это требует криволинейной поверхности представления геометрии, либо в качестве формата ***IGES*** (формата криволинейной поверхности) файла или ACAD (треугольной сетки) с включением кривизны (что выполняется для Savant начиная с версии 18.0). Для любой реальной задачи с привлечением криволинейных поверхностей с источником в виде антенны, и где значительная часть отражающий лучей от таких поверхностей падает и отражается от других поверхностей, настоятельно рекомендуется использовать формат модели ***IGES***, содержащей криволинейную поверхность поверхности (например, ***NURBS***, ***Bi-cube***), или граненую модель с учетом кривизны.

6.1 Загрузка модели окружающего пространства

Нажмите кнопку ***New Project*** на линейке меню и загрузите модель ***Tutorial4/radome.facet***. Появляется диалог модели CAD для масштабирования его в метры или другие единицы от других единиц (рис. 6.2). Единицы модели CAD в примере метры, так что нажмите ***Cancel***.

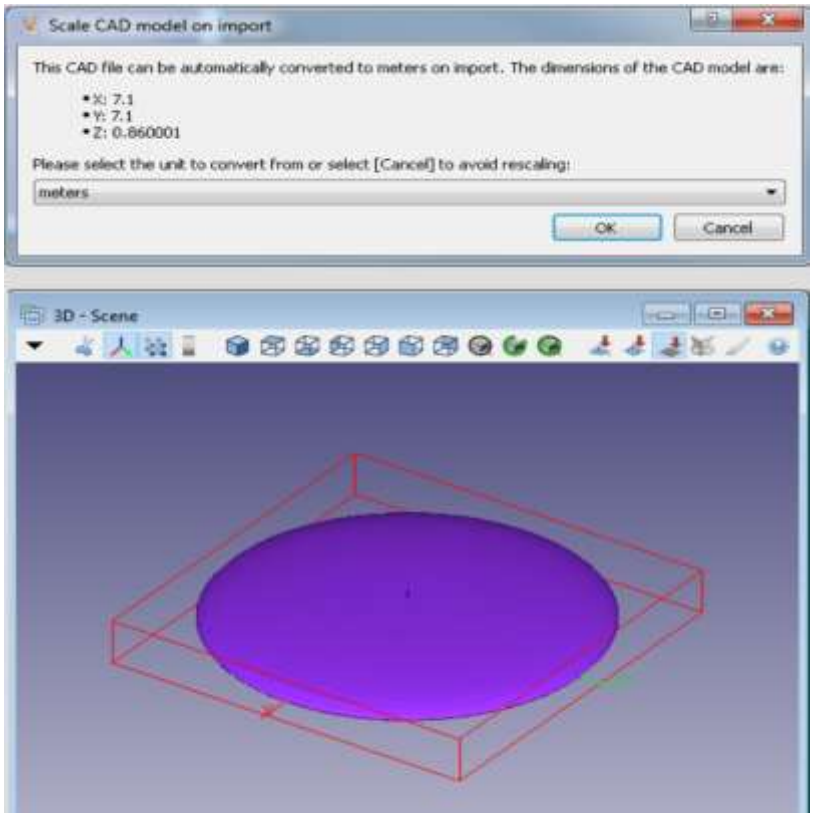


Рис. 6. 2. Импорт модели пространства антенны в виде эллипсоида

Раскройте узел ***Scene*** и выберите узел ***radome*** в дереве проекта. Раскройте папку ***Bounding Box***. Видим, что *р*азмер пространства анализа (***radome***) равен 7.1 м x 7.1 м x 0.86 м (рис. 6.3).

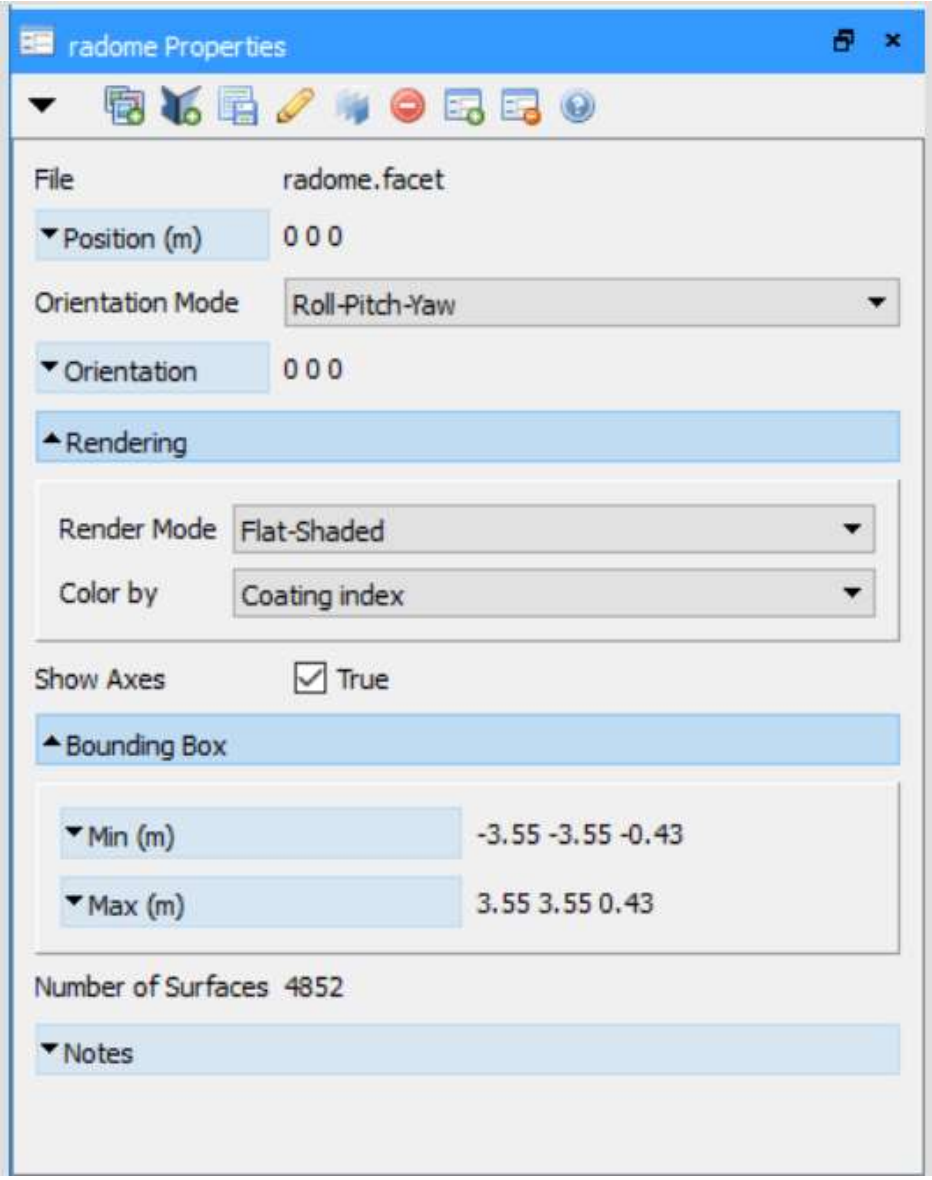


Рис. 6. 3. Выбор ориентации и размеров импортированного пространства анализа

Разверните папку ***Rendering*** и установите ***Render Mode*** как проволочный вид ***Wire-Frame***. Цвет пространства анализа установлен в свойствах индекса покрытия ***Coating Index***. Внутренняя структура области анализа имеет другой цвет, чем её внешняя поверхность, так как имеет другой индекс покрытия (рис. 6.4).

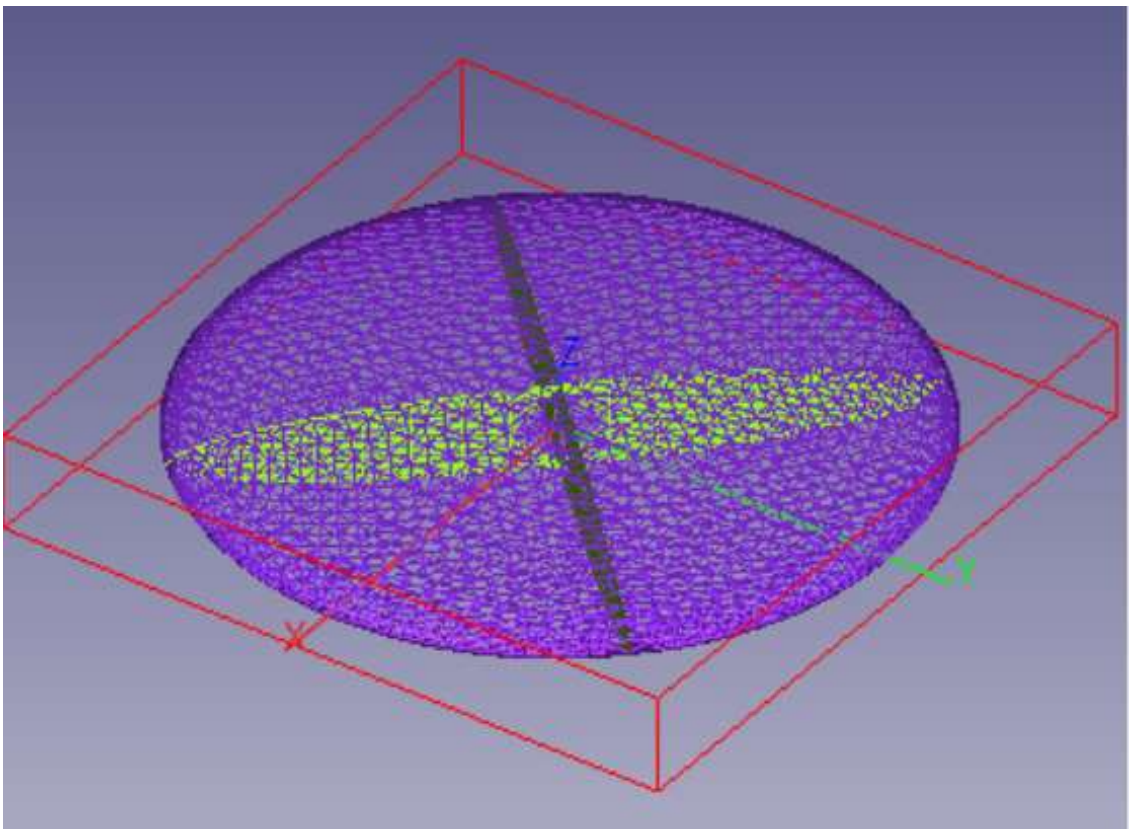


Рис. 6.4. Представление пространства анализа в проволочном виде

6.2 Материал среды пространства антенны

В папке панели ***Rendering*** из пространства ***radome***, поставьте ***Render Mode*** как **Wire-frame** для лучшего просмотра. Установите цвет ***Color by*** на значение ***Entire Model*** *(модель внутри)*. Внутренняя часть модели изменит цвет на желтый.

Разверните узел ***Materials*: *Index Coatings*** и узел ***Coatings: PEC***. Существует два дочерних узла: **Coat Index 1 и Coat Index 2**. Каждая грань в модели CAD имеет свой индекс покрытия, и это список уникальных индексов покрытия в модели.

Первая группа ***Index Coatings*** содержит список всех показателей покрытия для моделей CAD. Конфигурация индексов покрытия настраивается в разделе ***Coatings*** (рис. 6.5).

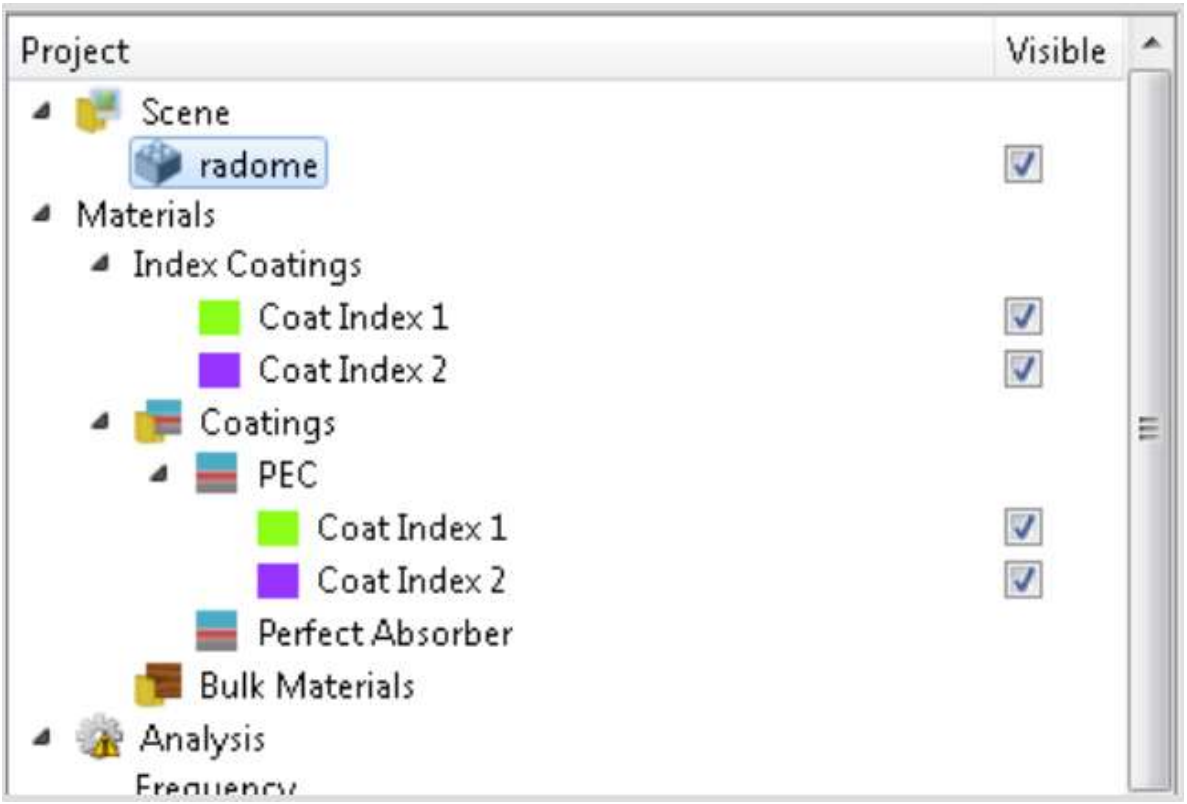


Рис. 6. 5. Список используемых покрытий в проекте

Выберите второй ***Coat Index 1*** в дереве проекта под узлом ***Materials: Coatings: PEC.***

Измените тип этого покрытия на **Perfect Absorber** перетаскиванием и наложением узла **CoaxIndex 1** на узел **Perfect Absorber**.

Разверните узел ***Perfect Absorber***. Теперь лучи от рупорной антенны, падающие на внутренние опорные точки пространства анализа, будут поглощаться и не будут генерировать отраженное поле.

Отметим, что внешняя поверхность области анализа становится желтой, а внутренняя структура становится зеленой, в соответствии со свойством ***Color*** на панели свойств для ***Coat Index*** *1*.

Можно сделать его более легким для просмотра, изменив цвет на желтый. Это можно сделать одним из следующих способов:

- -разверните кнопку ***Color*** и настройте RGB = (85,255,255),
- или нажмите кнопку рядом с ней и выберите голубой (светло-синий) из цветовой палитры (рис. 6.6).

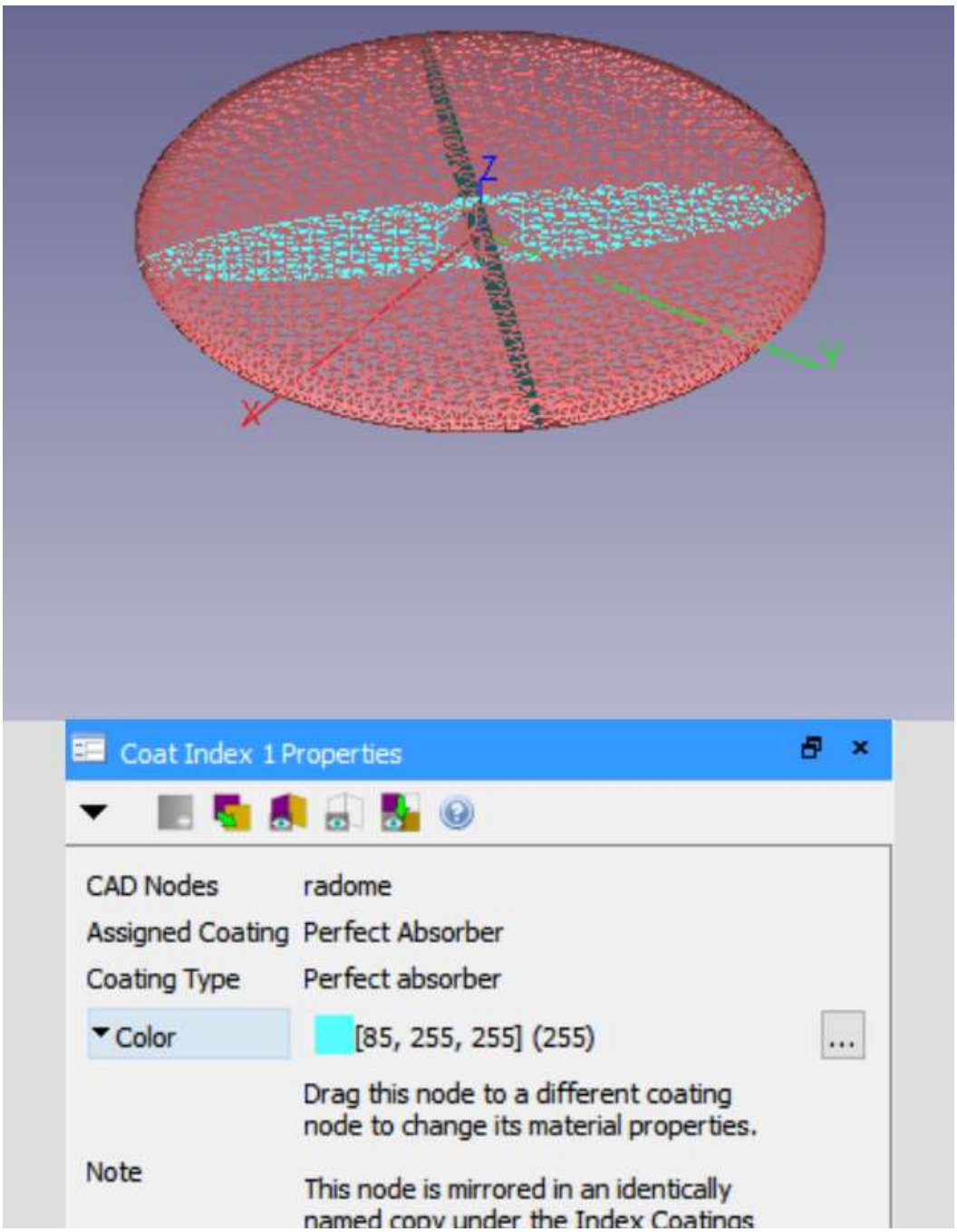


Рис. 6. 6. Выбор секущей поверхности, на который накладывается условия идеального поглощения

Выберите второй ***Coat Index 2*** в дереве. Теперь внешнее пространство становится фиолетовым, а внутренняя структура становится желтой. Если для параметра ***Rendering Mode*** модели CAD установлено значение ***Entire Model*** (как здесь), вся модель окрашивается в соответствии с одним цветом, указанным в панели свойств модели CAD.

Однако при выборе узла ***Coat Index*** в дереве проекта все поверхности с этим индексом покрытия окрашиваются в соответствии с цветом ***Color*** на

панели свойств ***Coat Index***. Это помогает идентифицировать поверхности с определенным индексом покрытия. Это внутренние точки ***Coat Index 1***, а внешняя поверхность обтекателя ***Coat Index 2***.

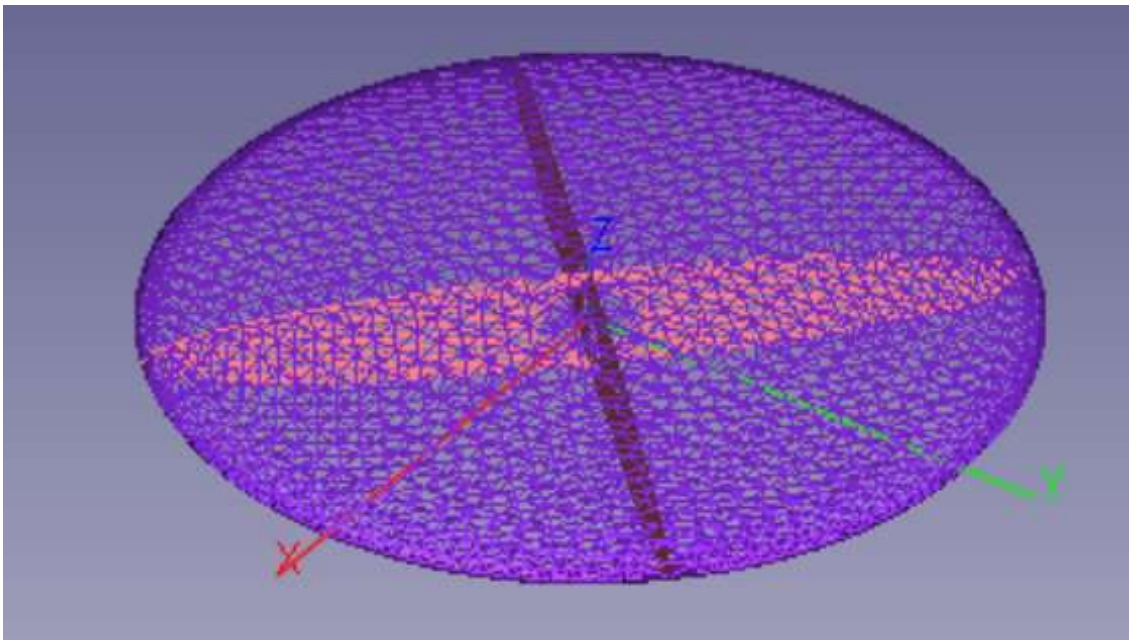


Рис. 6. 7. Окраска пространства анализа в фиолетовый цвет

Кликните правой кнопкой мыши на ***Coatings*** и выберите ***Add Coating***.

Кликните и перетащите узел ***Coat Index 2*** вниз на вновь созданный узел ***Coat 1*** и выберите ***Coat 1***. В панели свойств для ***Coat 1***, установите тип покрытия ***Coating Type*** на ***Single layer dielectric***.

Установите толщину покрытия ***Thickness (mm)*** = 20.0. Большинство пространственных параметров в программе *Savant* фиксируются в метрах. Однако толщины покрытия имеют единицу измерения по умолчанию в миллиметрах. Это значение по умолчанию можно изменить на панели свойств узла ***Preferences*** в нижней части дерева проекта.

Разверните папку ***Layer Material Properties*** и установите характеристики слоя, показанные на рис. 6.8.

Установите ***Backing Material = None (Penetrable coating*** - покрытие, через которое могут проникать лучи*)*.

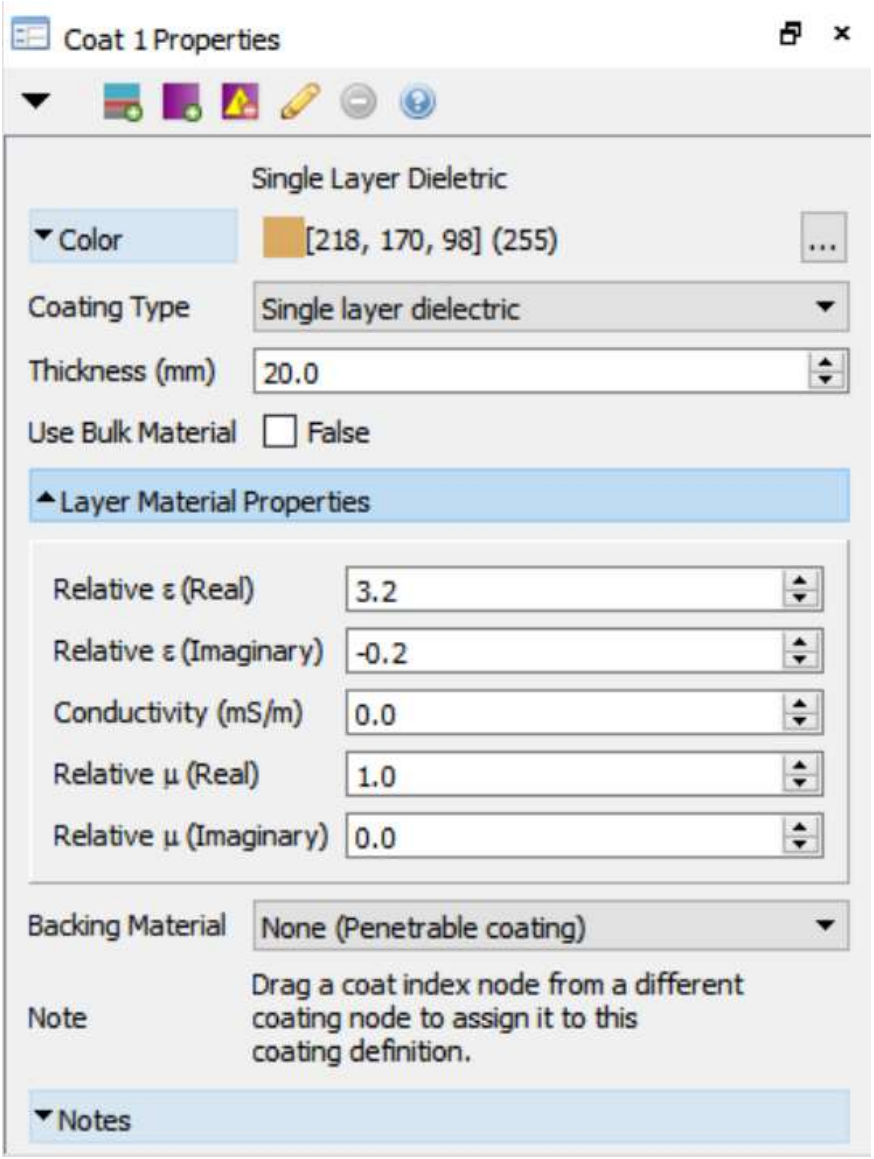


Рис. 6.8. Задание характеристик слоя покрытия

Сохраните проект как ***Tutorial4.savant*** в директории ***Tutorial4***.

6.3 Загрузка ДН рупорной антенны

Загрузите ДН в виде табличного файла, для чего кликните кнопку ***Add Antenna from File...*** в главном окне инструментальной линейки. В менеджере поиска откройте ***Tutorial4/horn.patdat***.

Окно ***3D-Scene*** показывает ДН в виде яблока (рис. 6.9). ДН не похожа на ДН рупорной антенны, потому что в настоящее время отображается на 10 МГц, что значительно ниже проектной частоты. Мы исправим это следующим образом.

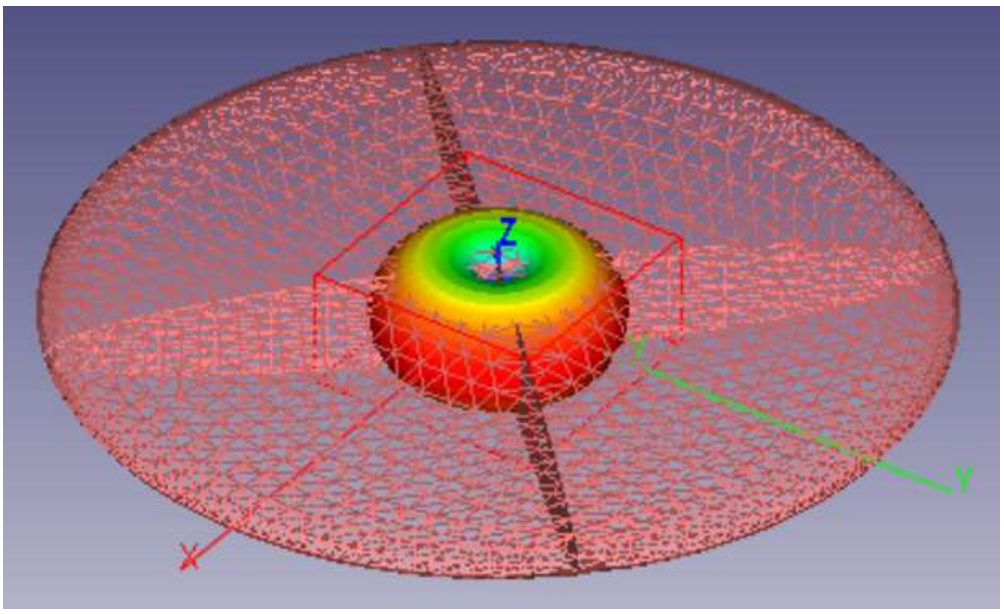


Рис. 6.9. Загрузка ДН антенны

Выберите узел *Scene*. В панели свойств, разверните папку ***Antenna Information***. ДН определена от 10 MHz до 3.5 GHz (49 шагов, рис. 6.10, т.е. 50 частотных точек). Рупорная антенна рассчитана для работы от 2.5 до 3.0 ГГц; вот почему на частоте 10 МГц ДН имеет вид ДН диполя; по умолчанию рабочая частота равна нижней заданной частоте в диапазоне.

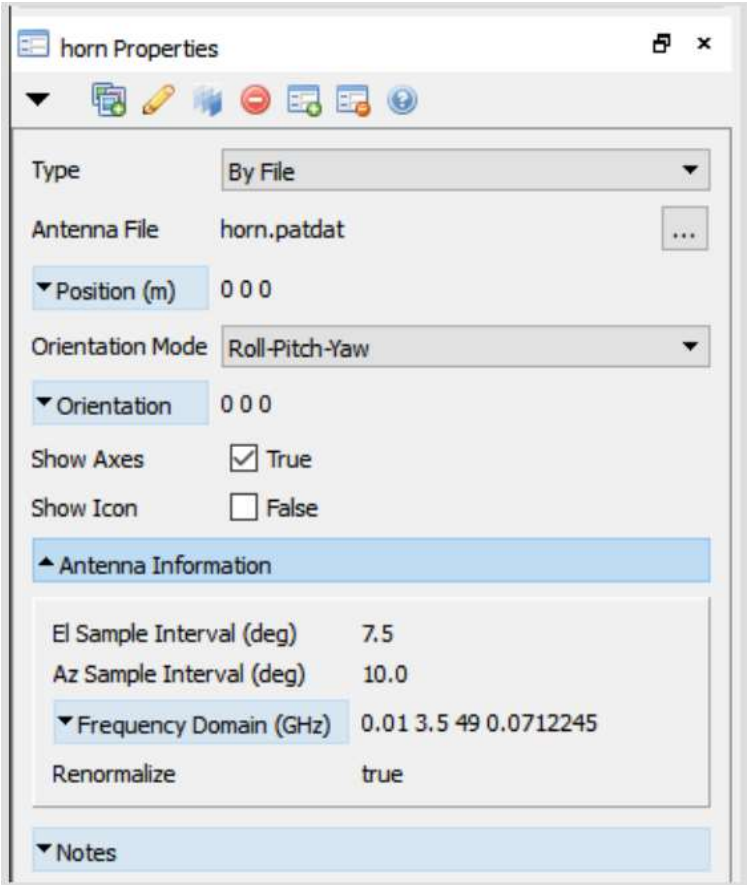


Рис. 6.10. Диалог свойств рупорной антенны

Можно просмотреть диаграмму направленности рупорной антенны на разных частотах. Для этого дважды нажмите на узел ***horn*** чтобы открыть выделенное окно визуализации для антенны, ***3D-horn.***

Разверните узел ***horn*** и выберите дочерний узел ***Pattern***. Включите опцию ***Color by Field Strength***. Установите ***Scale*** на ***Decibel***. Подстройте ***Render Frequency (GHz)*** в окне установок свойств ***horn***.

Наблюдайте, как меняется ДН. Она начинает меняться, излучая в одну сторону с частот около 1 GHz. Частота моделирования всегда определяется в узле ***Analysis*: *Frequency*** в дереве проекта, хотя моделирование не запускается, если частота моделирования лежит вне границ заданных антенной Tx и/или Rx.

Установите рабочую частоту ***Frequency*** для рупорной антенны на 3.0 GHz (рис. 6.11) и нажмите ***Enter***. Если она не совпадает точно ни с одной из частотных точек выборки в ***horn.patdat***, Savant интерполирует данные из двух ближайших частот.

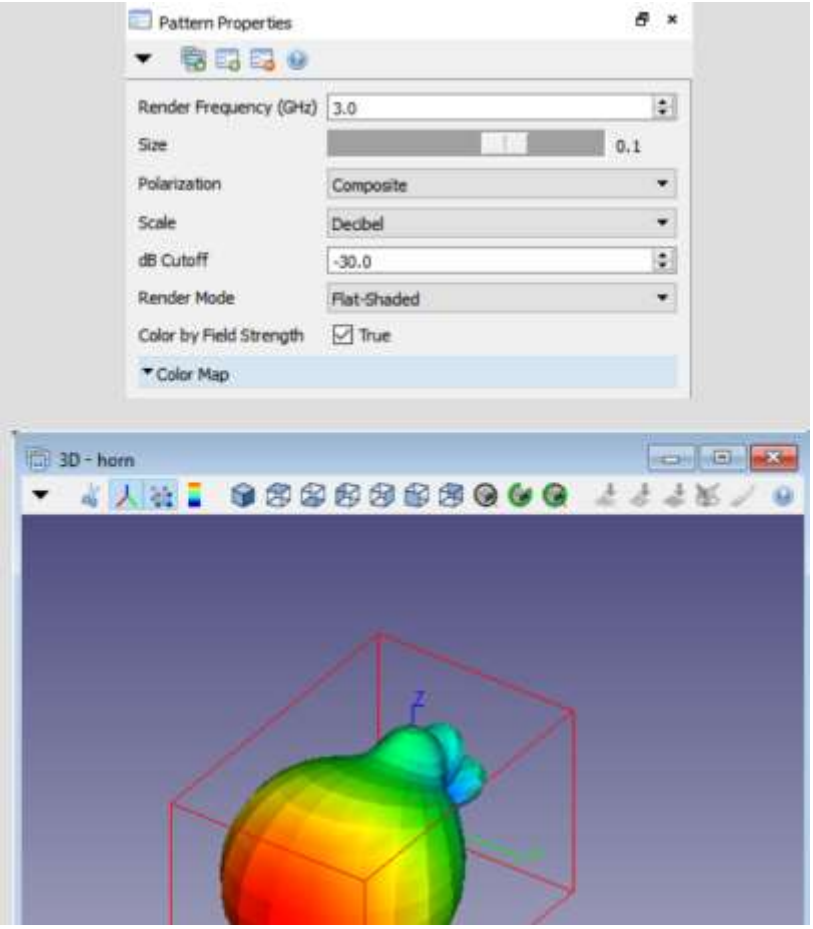


Рис. 6.11. ДН рупорной антенны на частоте 3 ГГц

Закройте окно ***3D-horn,*** так чтобы была видна только ***3D-Scene***. Если вы случайно закрыли окно ***3D-Scene***, его можно открыть повторно, нажав кнопку ***Visualize Scene*** на главной панели инструментов.

6.3.1 Установка положения антенны в моделировании.

Выберите узел ***horn*** снова и разверните папку ***Position*** в панели свойств.

Установите положение антенны (рис. 6.11) в точку:

- X: 0.54
- Y: 0.04
- Z: 0.0.

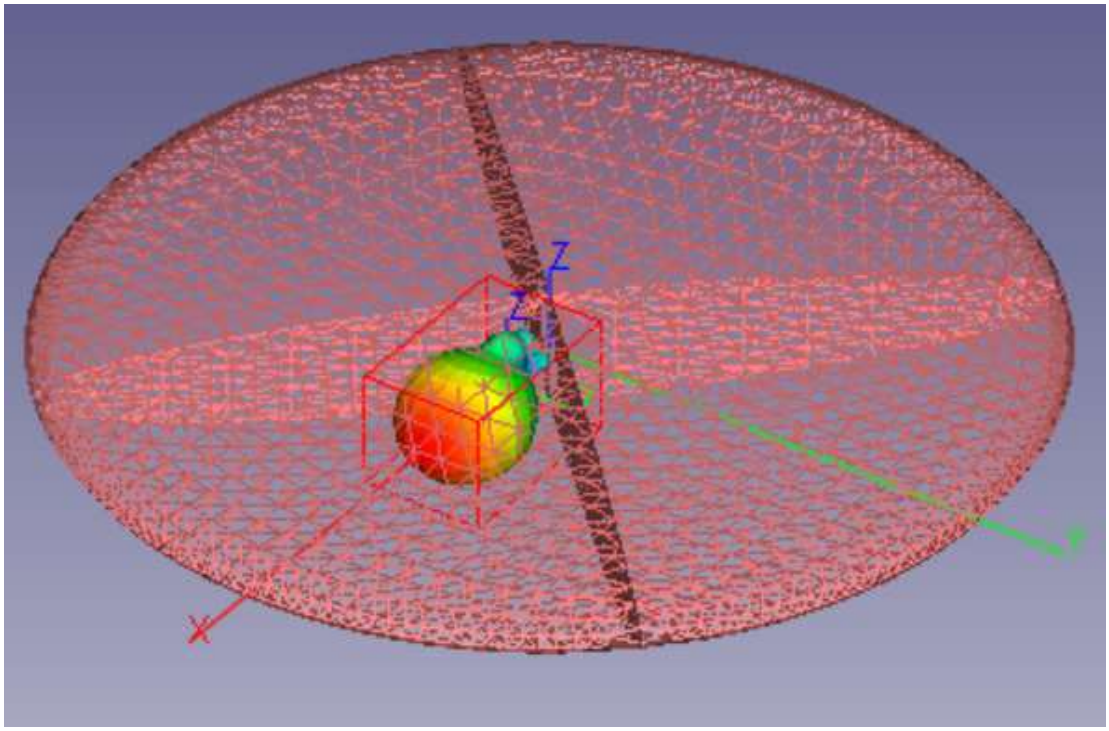


Рис. 6.11. Установка ДН рупорной антенны

Пересохраните проект как ***Tutorial4.savant***.

6.4 Определение сетки точек пространственного наблюдения

Выберите узел ***Analysis***. Установите тип анализа ***Analysis Type*** на **Field Distribution**. Узел расчета ближнего поля ***Near-Field*** появляется под узлом

Analysis. Установите в качестве ***Tx Antenna*** рупорную антенну ***horn*** (рис. 6.12).

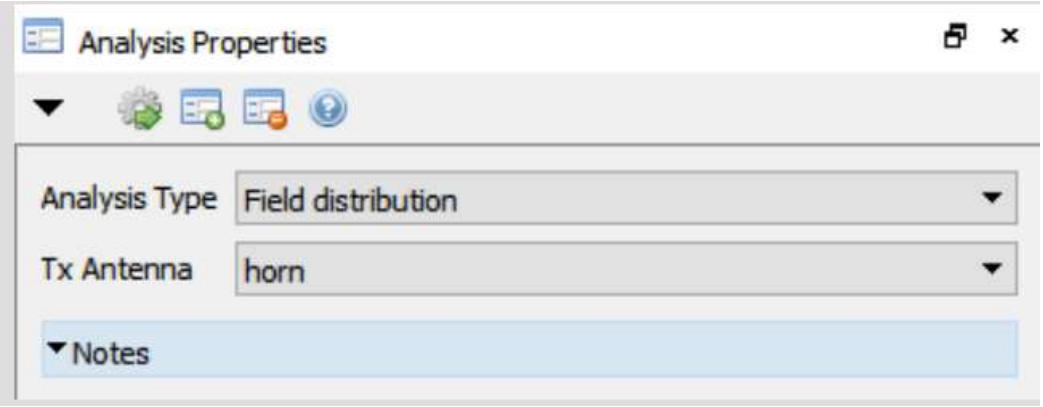


Рис. 6. 12. Задание на расчет ближнего поля антенны **horn**

Выберите узел **Near-Field** в дереве проекта. В панели свойств установите вывод ближнего поля ***Near-Field Type*** на прямоугольную сетку ***Rectangular Grid***.

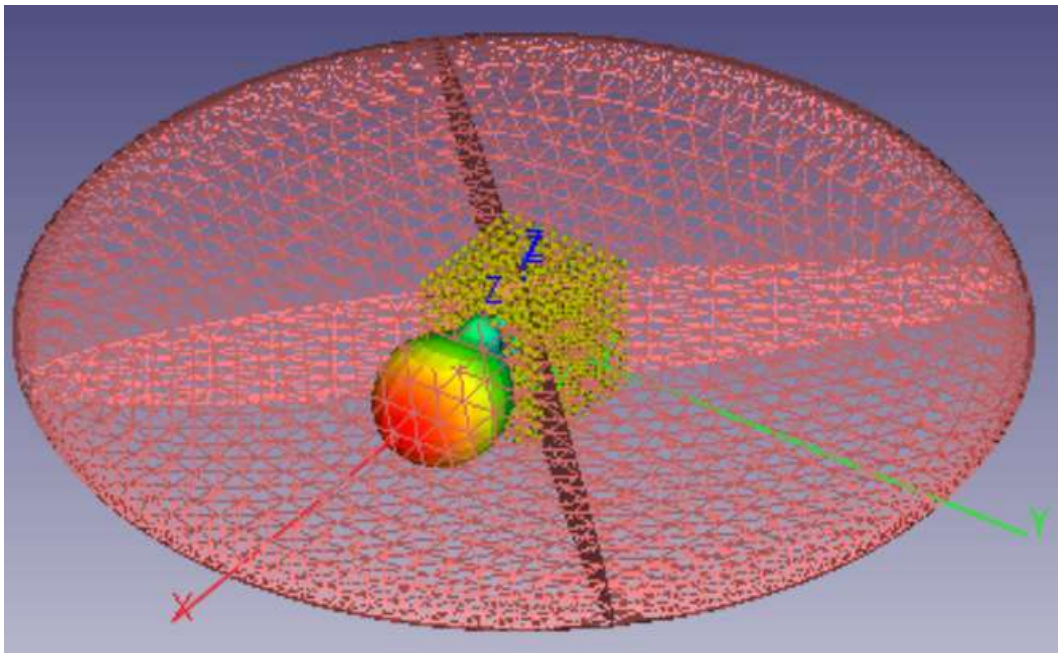


Рис. 6.13. Задание сетки ближнего поля в области анализа

Установите следующие величины сетки ближнего поля:

- по оси ***X Range***: ***Start***: 1.0, ***Stop***: 3.5, ***Number of Steps***: 60.
- для ***Y Range***, установите ***Start***: -0.9, ***Stop***: 0.9, ***Steps***: 36.
- для ***Z Range***, установите ***Start***: 0, ***Stop***: 0.

В окне ***3D-Scene***, кликните кнопку ***Top View***. Затем нужно выполнить панорамирование и масштабирование для фокусировки на пространственной сетке точек наблюдения и антенны (рис. 6.13-6.14).

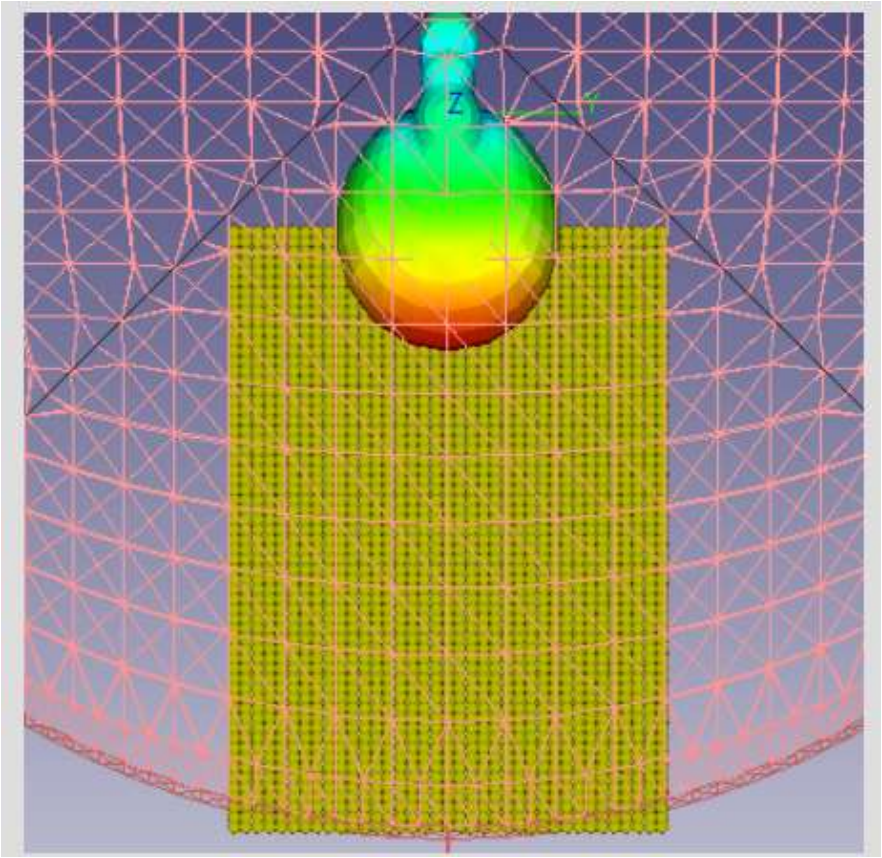


Рис. 6.14. Сетка ближнего поля рупорной антенны

6.5 Рабочая частота и метод расчета

Выберите узел ***Frequency*** и установите опцию ***Domain Type*** как ***Single***. Установите ***Frequency*** = 3.0 GHz.

Выберите узел ***Methodology***. Установите ***Ray Density (per wavelength)*** =2.0 и ***Max Number of Bounces*** = 4.

В узле ***Output*** установите выводы данных по умолчанию: падающее поле, поле рассеяния и статистика лучей.

6.5.1 Задание дополнительных установок

Можно выбрать компромисс между точностью и скоростью расчета. Для этого выберите узел ***Advanced Features*** и включите опцию точности ближнего поля ***Override NF Accuracy Defaults***.

Новый узел, ***NF Accuracy Defaults***, появляется как дочерний от узла ***Advanced Features***. Выберите этот узел.

Установите ***Rx/Obs-Pts Dist Ratio*** = 1.0. Это ускоряет моделирование, но жертвует точностью при наблюдении поля вблизи поверхностей за счет уменьшения накладываемых точек расчета интеграла излучения.

Оставим значение относительного расстояния ***Tx Distance Ratio*** =5.0 и порога высокого порядка ***Higher-Order kR Threshold*** = 20.0 (рис. 6.15).

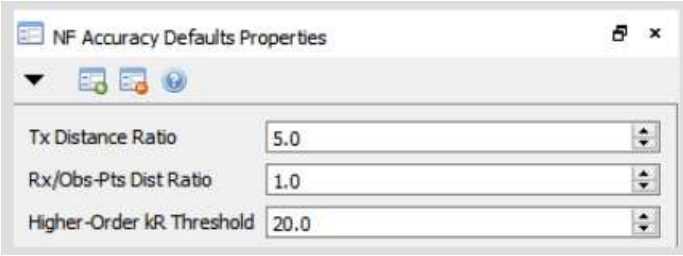


Рис. 6.15. Установки по ближнему полю

6.6 Запуск моделирования и вывод результатов расчета

6.6.1 Генерация и вывод данных ближнего поля.

Выберите ***Run and Save*** из главного меню ***Run***. Моделирование займет несколько минут для завершения на одноядерном компьютере. Если имеется графическая карта GPU, то расчет займет меньше минуты.

После завершения расчета, точки наблюдения изменят масштаб цвета для отображения результата (рис. 6.16) и узел ***Near-Field*** появится под узлом ***Results***.

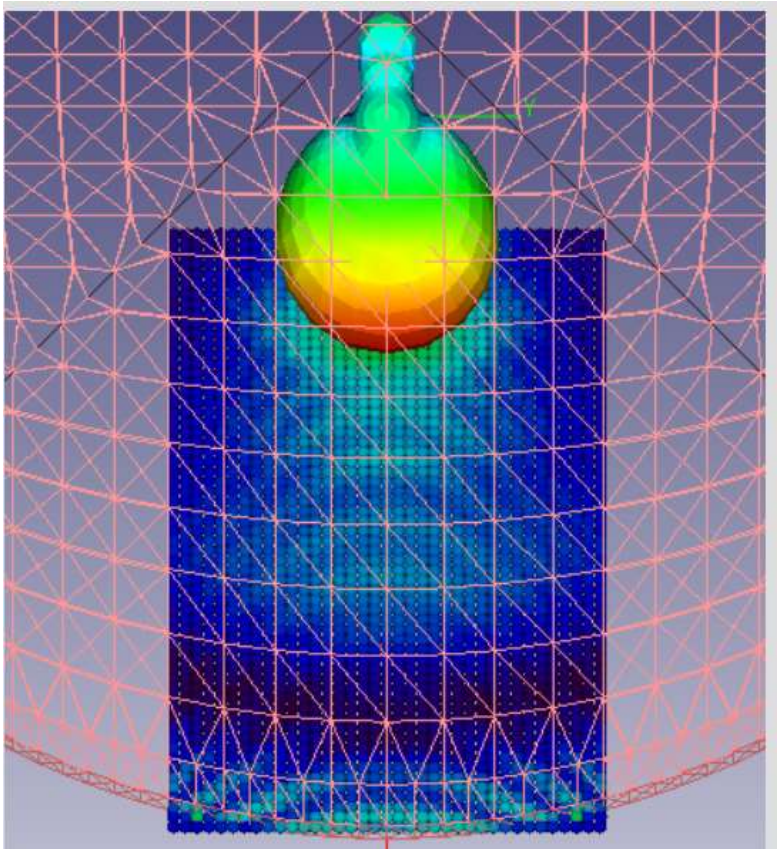


Рис 6.16. Вывод ближнего поля

Выберите ***Results***: узел ***Near-Field***. Разверните папку ***SBR Ray Statistics*** (рис. 6.17).

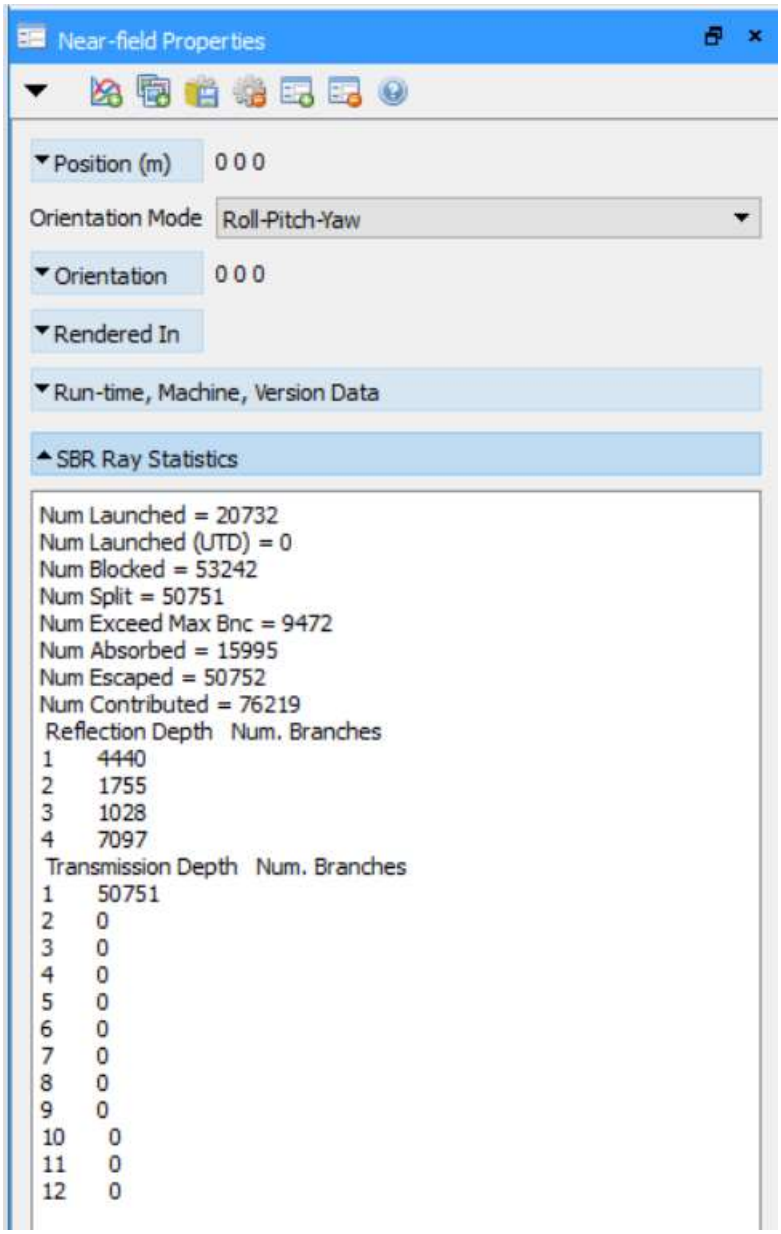


Рис. 6.17. Статистика расчета лучей

В панели свойств для узла ***Windows: 3D-Scene: Near-Field***, включите ***View as Plane(s)***. Включите опцию ***Smooth Shading***.

- Установите ***Result Component*** на ***Incident Field***.
- Установите ***Scale Type*** как ***Decibel***.
- Установите ***Polarization*** на ***Composite E***.
- Отключите опцию ***Visible*** далее для узла **Scene: radome** в дереве проекта, чтобы видеть результаты более ясно (рис. 6.18)

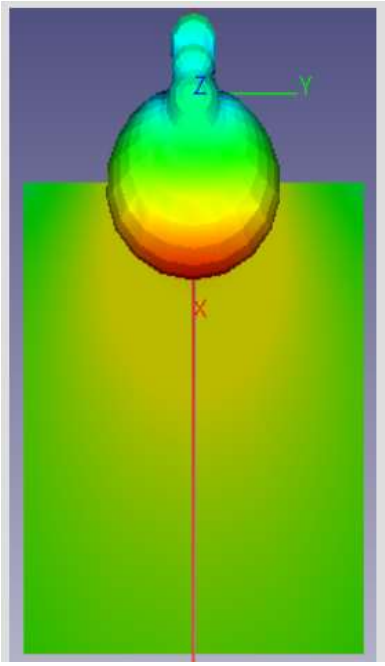


Рис. 6.18. Ближнее поле в районе рупорной антенны

6.6.2 Визуализация альтернативных компонентов поля и изменение цветовой шкалы.

- Выберите снова узел ***Windows: 3D - Scene: Near-Field***.
- Установите ***Result Component*** на ***Scattered Field*** и наблюдайте, как изменяется плоскость наблюдения (левое изображение рис. 6.19).
- Установите ***Result Component*** как ***Total Field*** (рис. 6.19, справа).

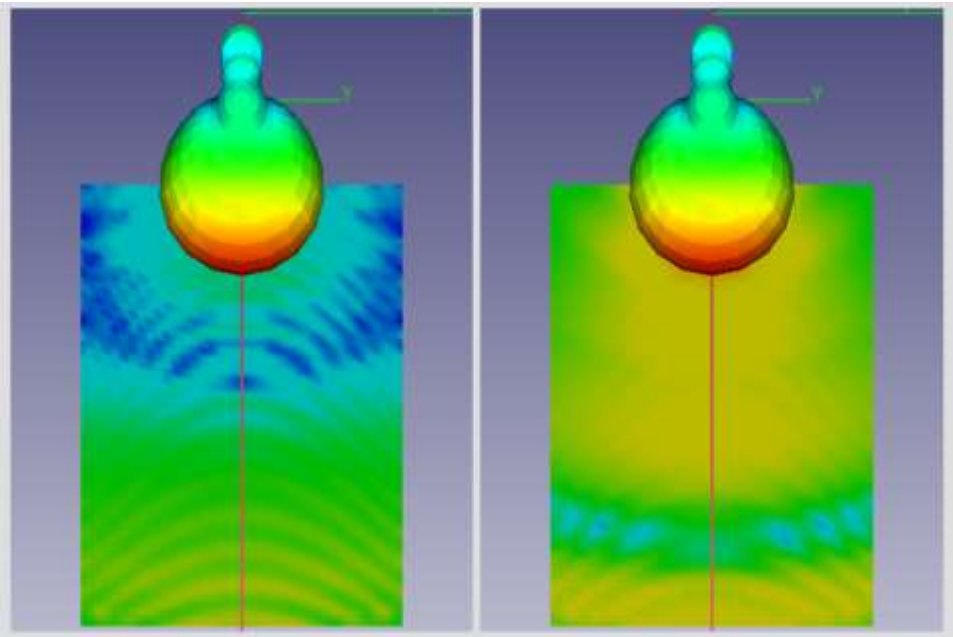


Рис. 6.19. Вывод компонентов ближнего поля в плоскости

Нажмите кнопку ***3D-Scene*** на панели инструментов в верхней части окна ***3D-Scene***. Если вы не можете найти там кнопку цветной панели, она может быть переполнена и скрыта на панели инструментов окна ***3D-Scene***. В этом случае вы можете либо расширить размер окна ***3D-Scene*** по горизонтали, пока не появится кнопка на панели инструментов, или щелкните дважды правой стрелкой на панели инструментов, чтобы показать какие-либо скрытые кнопки на панели инструментов в выпадающем списке.

Появляется панель масштабирования цвета в единицах dB (V/m) (рис. 6.20).

Используйте левую кнопку мыши для подстройки масштаба цвета для диапазона от -10 dB (V/m) до +25 dB (V/m) перетащив цвет-бар до +25 дБ, при нажатии кнопки на верхний замок, перетащив цвет-бар около -10 дБ, и, нажав нижнюю кнопку блокировки.

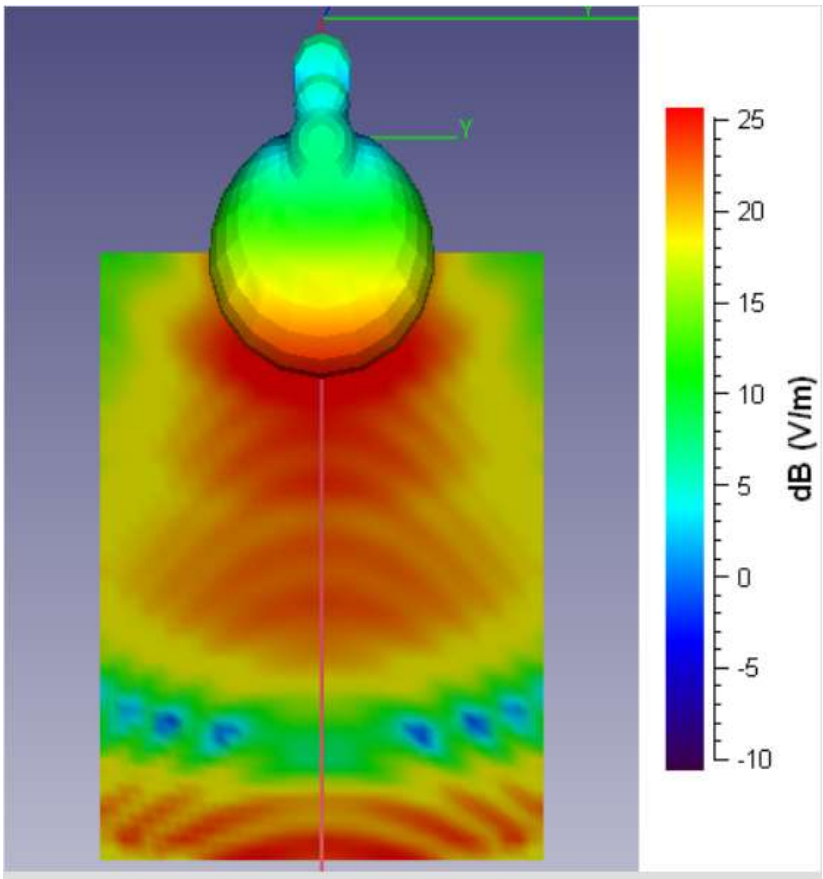


Рис. 6.20. Нормировка цвета ближнего поля меняя границы

Включите видимость пространства анализа снова в узле ***radome***. Нажмите кнопку **color-bar** на инструментальной линейке сверху панели ***3-D Window*** снова для удаления видимости панели ***Color Map***.

Занесите вид по умолчанию в окно ***3D-Scene*** (рис. 6.21).

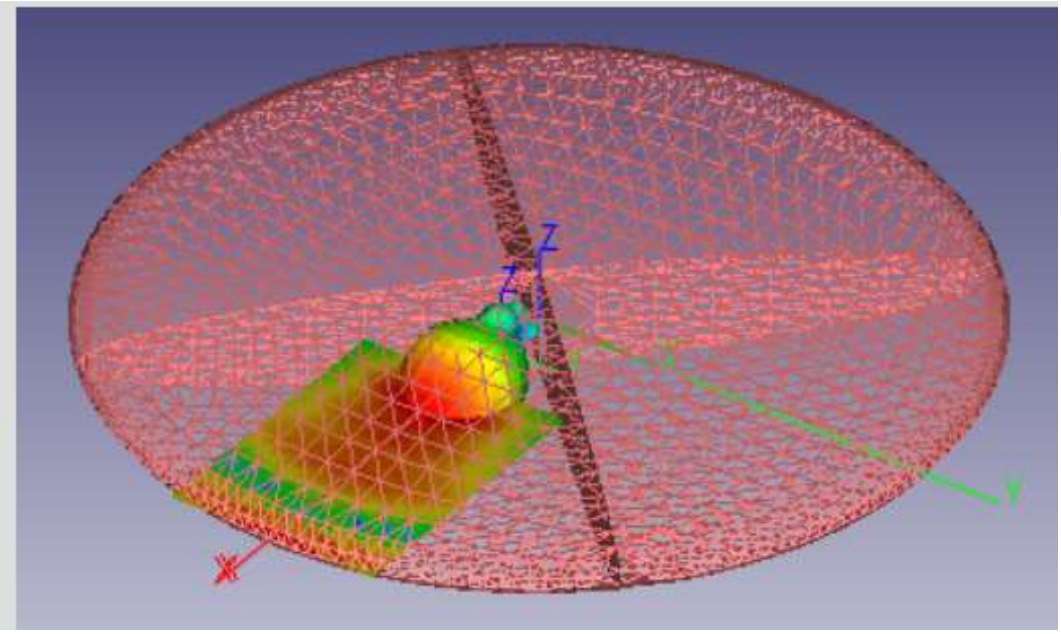


Рис. 6.21. Ближнее поле в пространстве анализа

6.7 Создание картины лучей и применение фильтров лучей

Визуальная трассировка лучей является диагностическим свойством программы, и свидетельствует, что параллельно с трассировкой лучей выполняется моделирование ***SBR*** в программе Savant. Лучи показывают геометрические пути распространения оптических лучей (ГО).

Выберите узел ***Visual Ray Trace*** в дереве проекта. В панели свойств, установите ***Max Frequency*** = 3.0 GHz (то же самое как в моделировании, когда мы устанавливали в узле ***Frequency*** на шаге 5).

В выплывающем селекторе ***Launch from*** выберите ***Transmitter***. Точка запуска луча ***Point*** установим как (0.5, 0.0, 0.0) метров, в точке нахождения рупорной антенны ***horn***.

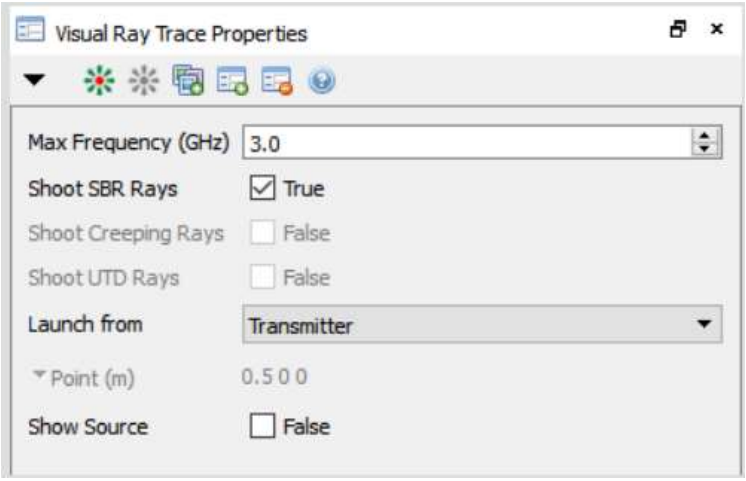


Рис. 6.22. Выбор опции запуска лучей

Выберите узел ***Visual Ray Trace*: *SBR***. Установите плотность лучей ***Ray Density (per wavelength)*** = 1.0. Это половина плотности лучей моделирования (которую мы рассматриваем в узле ***Methodology*** на шаге 5), но мы уменьшаем количество лучей для лучшего просмотра.

Установите ***Max Number of Bounces*** = 4 (то же самое, как в моделировании, снова в узле ***Methodology***). Кликните кнопку ***Shoot Rays*** в панели свойств. Трассы лучей показаны на рис. 6.23.

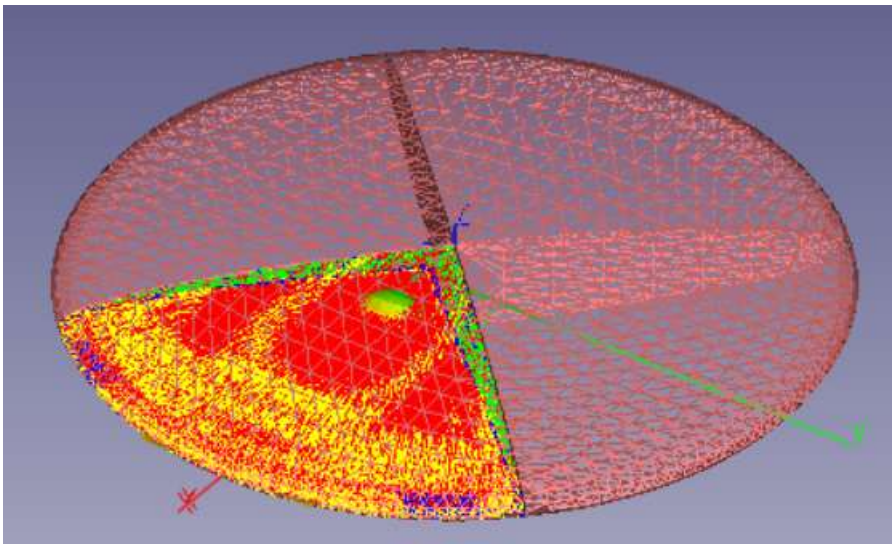


Рис. 6.23. Лучи в сегменте антенны

Статистику лучей можно видеть в разделе Ray Statistic (рис. 6.24).

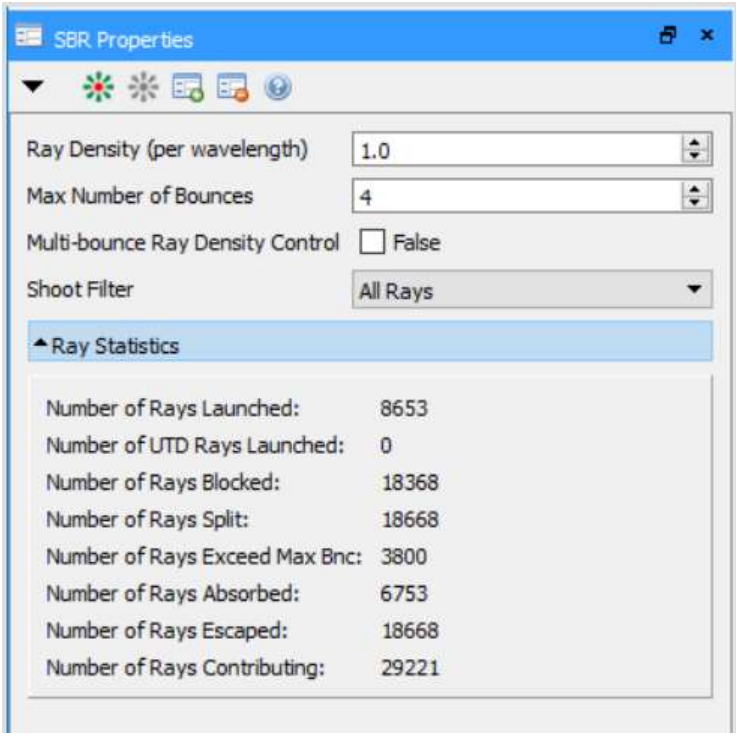


Рис. 6.24. Статистика лучей

После запуска лучей, узел ***SBR*** добавляет несколько дочерних узлов. Разверните узел ***SBR*** и выберите узел ***SBR: Rendering*** (рис. 6.25).

Включите ***Draw Exit Rays***. По умолчанию сегменты трасс лучей, которые уходят вне пространства анализа, не чертятся. Установите величину ***Exit Ray Length*** ≈ -20, используя слайдер.

Это логарифмический слайдер, так что отрицательная длина показывает часть длины по умолчанию.

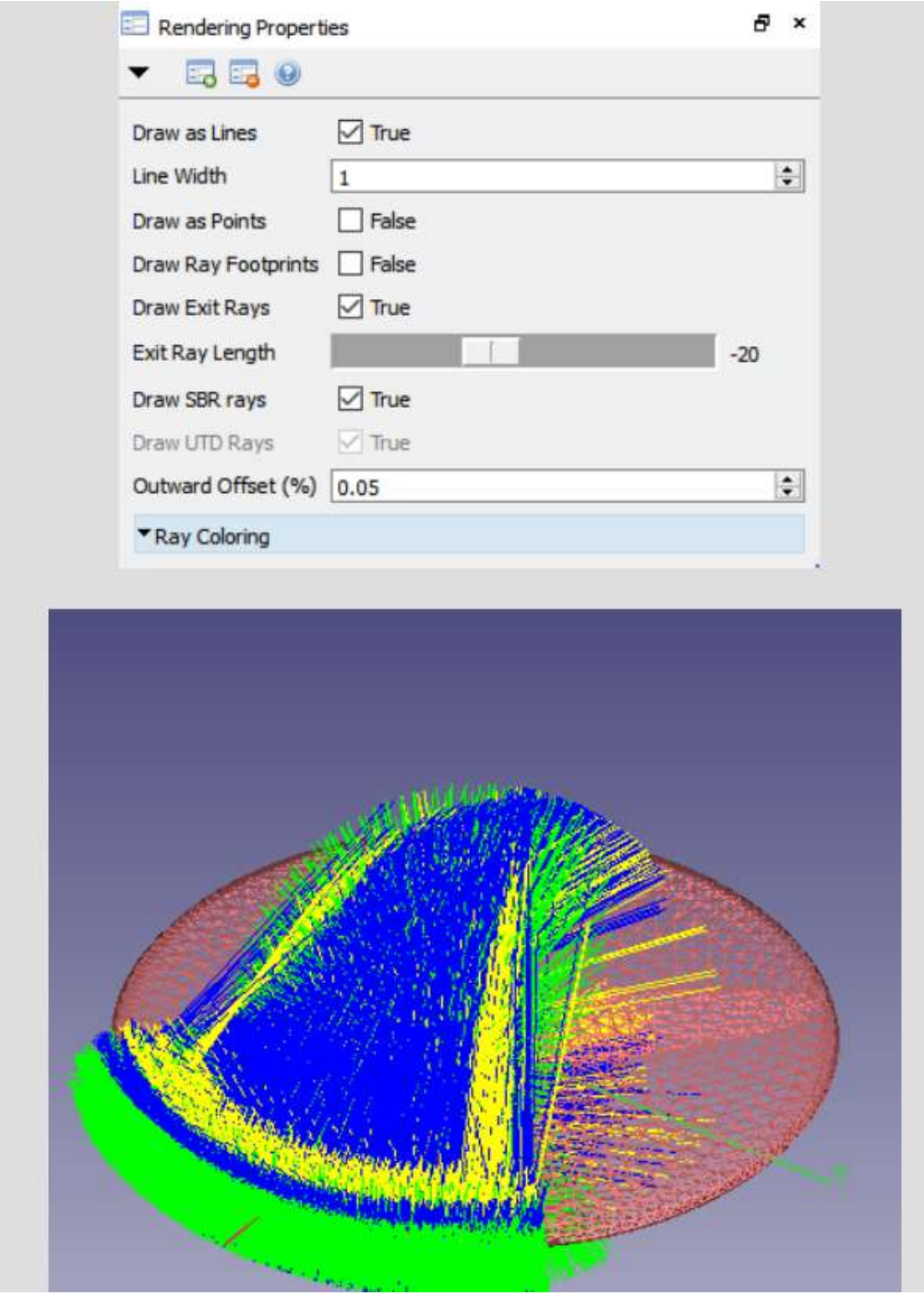
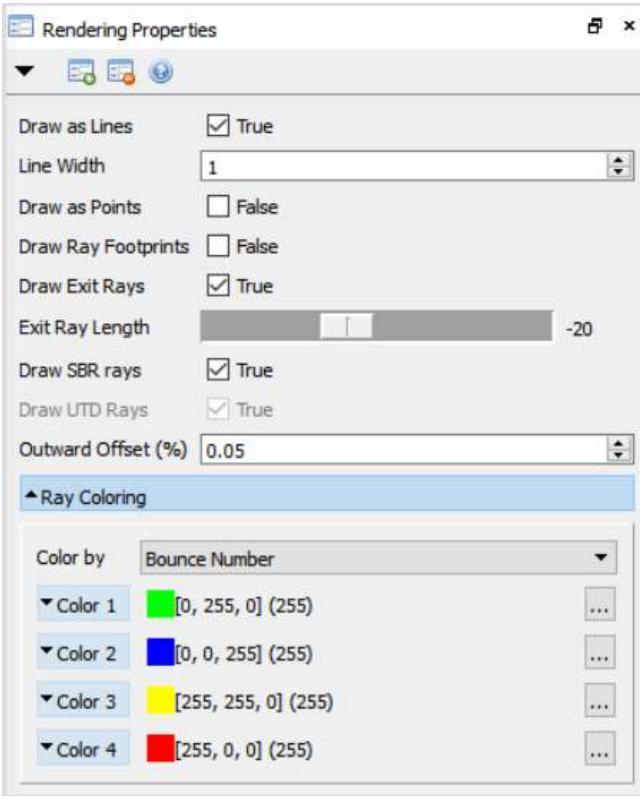


Рис. 6.25. Трассы лучей

Разверните папку ***Ray Coloring***. Установите ***Color by*** как ***Bounce Number*** (рис. 6.26).



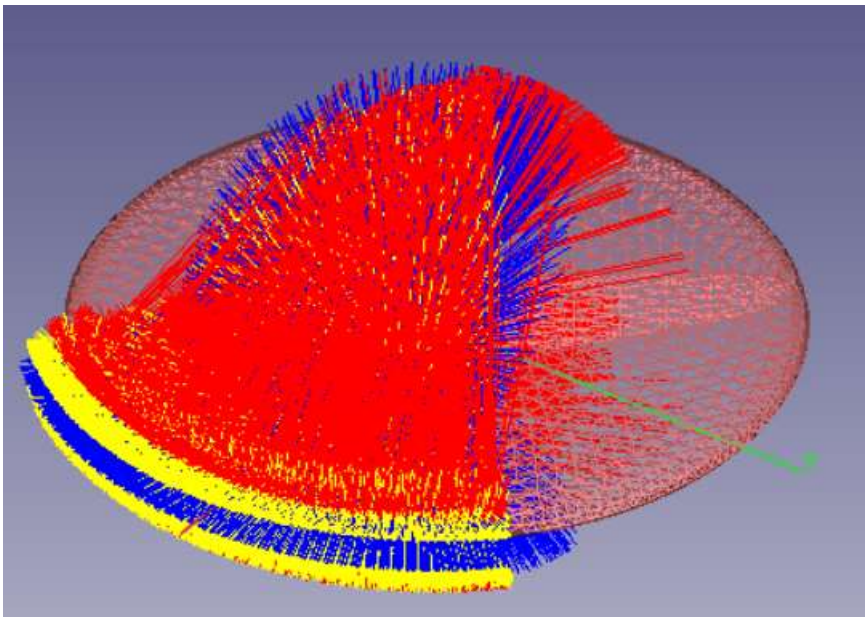


Рис. 6.26. Расцветка лучей по последовательности отражения

6.8 Применение фильтров SBR для просмотра лучей

Выберите узел ***SBR: Filters***. Панель свойств обновляется для отображения ***Filters Properties***. Эта панель свойств состоит из двух разделов:

фильтр полных треков ***Filter Full Ray Tracks:*** и фильтр индивидуальных лучей ***Filter Individual Ray Bounces***.

Переключатели на ***By # of Reflections*** и ***By # of Transmission*** позволяют использовать фильтры, которые работают на всех ветвях лучей трека в соответствии с количеством пучков отражения/передачи, которые происходят при распространении лучей. Тумблер ***By Bounce #*** включает фильтр, который работает на подмножества трасс лучей.

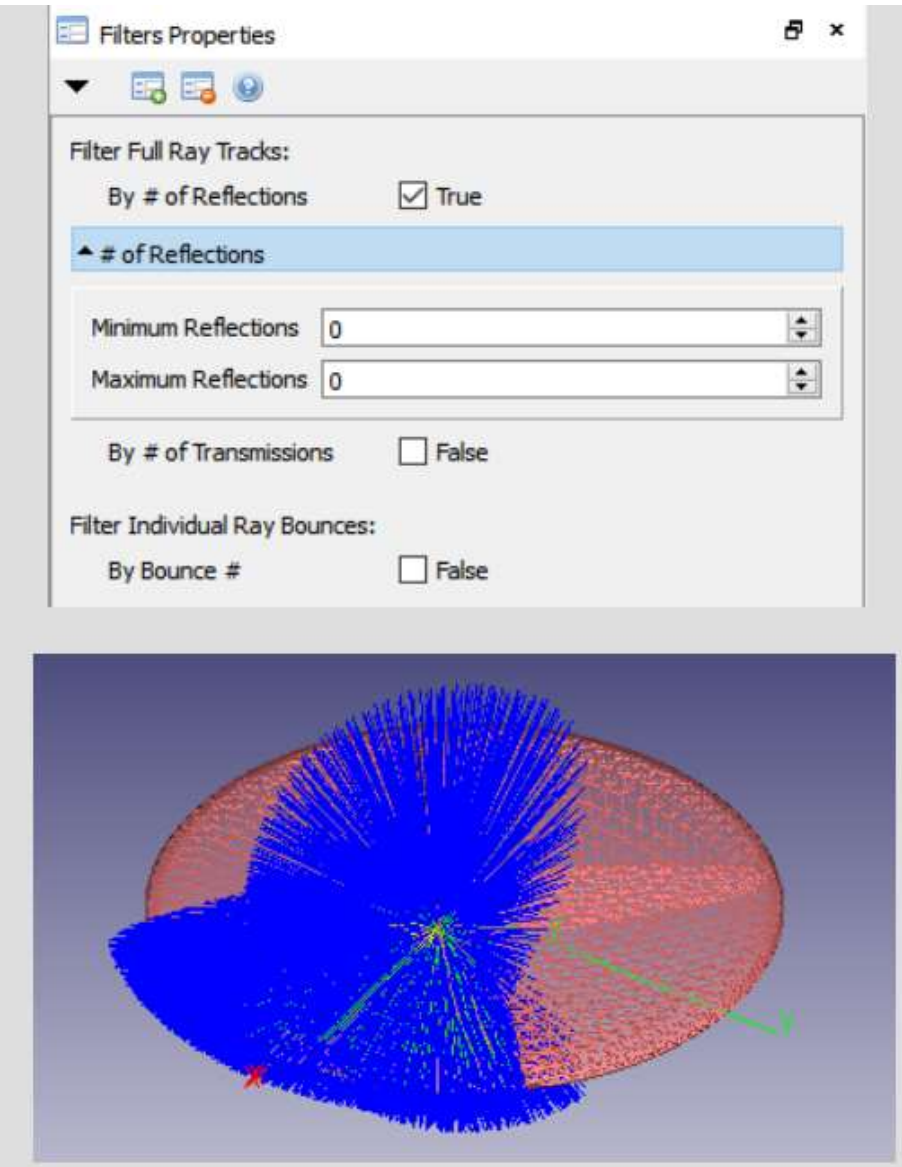


Рис. 6.27. Установка опций просмотра лучей

Включите ***By # of Reflections*** и затем разверните её.

Установите **Minimum, Maximum Reflections** на величины (0,0).

Тогда показываются только лучи, покидающие ***Tx*** (рупор) и пронизывающие область анализа (radom), а также лучи, которые освещают два ребра внутри области анализа; вспомните, что мы не замечаем их, когда освещаем идеально поглощающую поверхность ***Perfect Absorber***.

Теперь лучи можно видеть, временно отключая опцию ***Draw Exit Rays*** в панели узла ***Rendering***, и регулировать вручную окно ***3D-Scene*** для увеличения верхней части антенны.

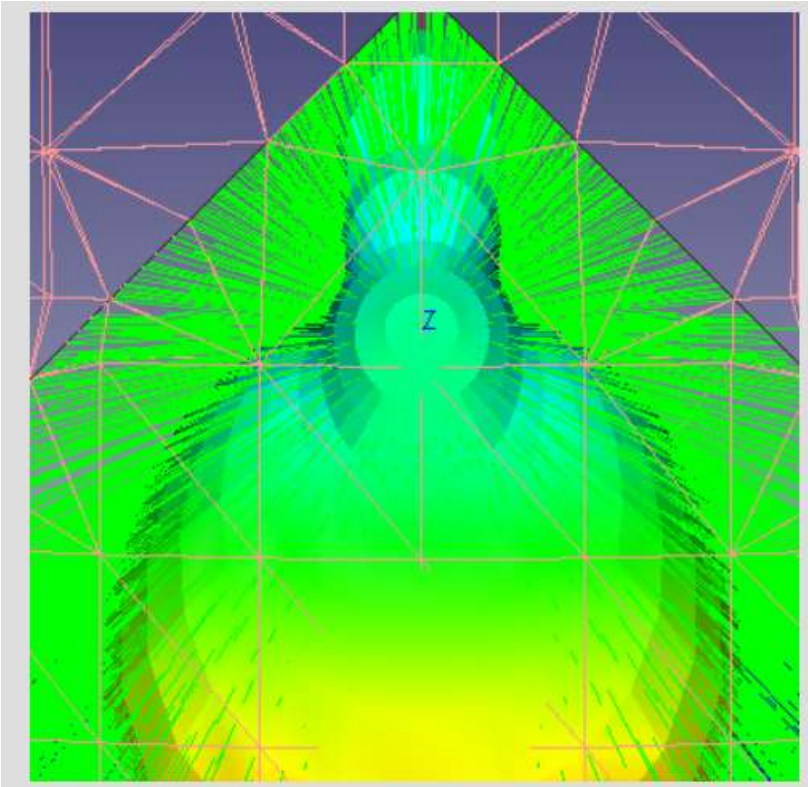


Рис. 6.28. Картина лучей

Выберите узел ***Rendering*** снова и включите ***Draw Exit Rays***. В окне ***3D-Scene***, кликните кнопку ***Default View***.

Выберите узел ***Filters*** снова и установите ***Minimum***, ***Maximum Reflections*** на значения (1,1). В этом случае показываются только лучи, которые отражаются перед пробегом.

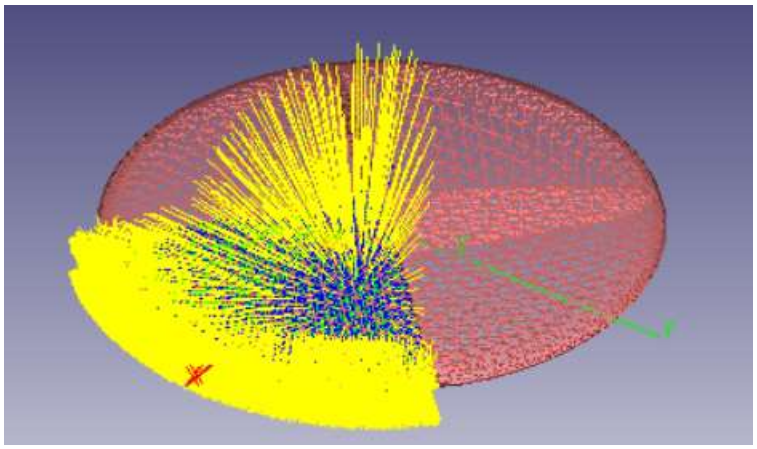


Рис. 6.29. Вывод только части лучей на просмотр

Снимите опцию ***By # of Reflections*** (рис. 6.30). Включите опцию ***By Bounce #*** и затем разверните ее. Установите ***Minimum***, ***Maximum Bounces*** на значение (0,1). Тогда отображаются только начальные сегменты лучей, выходящие из точки ***Tx***, и только для треков лучей, которые выходят из одного отражения.

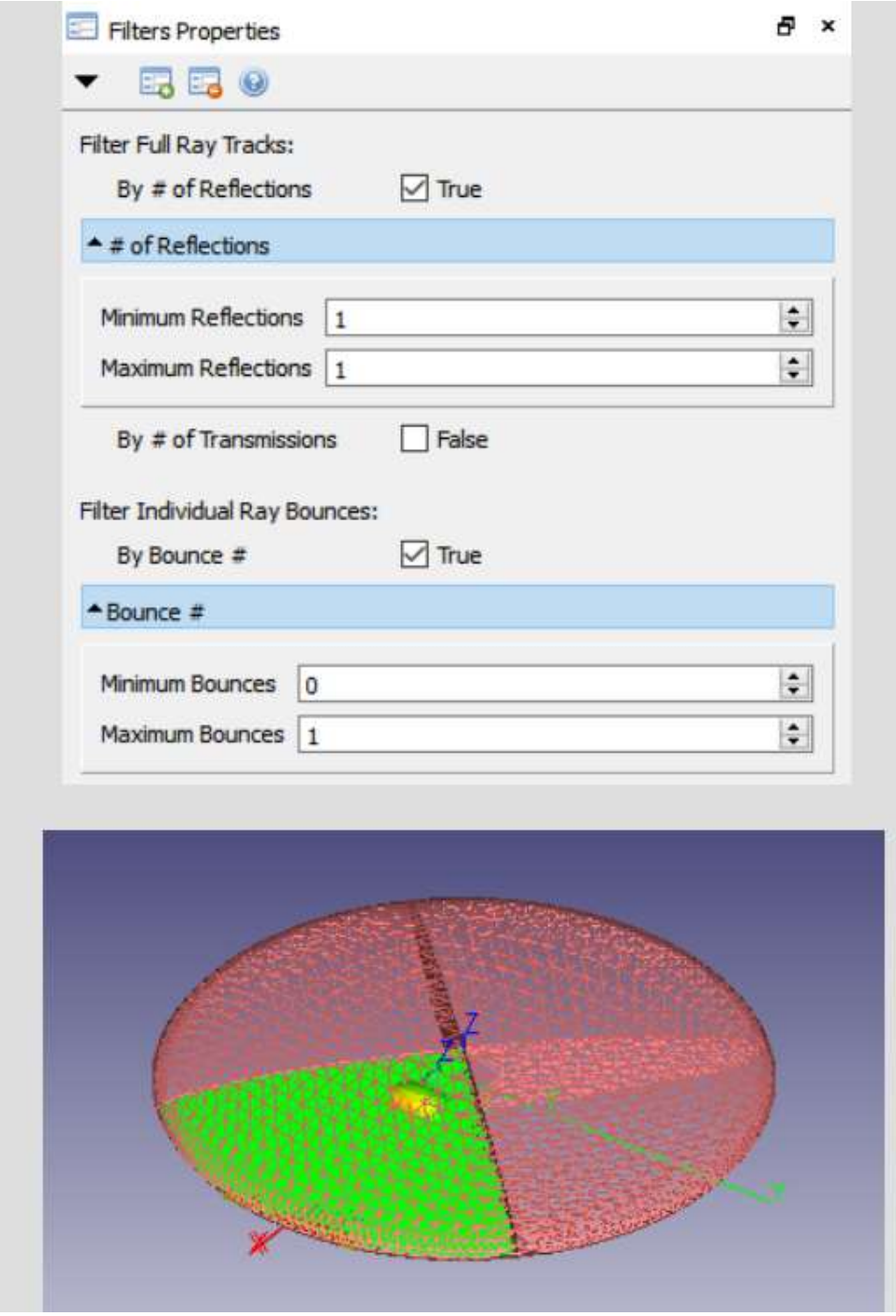


Рис. 6.30. Установка максимального и минимального отражения равными 1

Установите ***Minimum, Maximum Bounces*** на значение (0,2). Теперь мы также видим сегменты лучей после отражения (рис. 6.31).

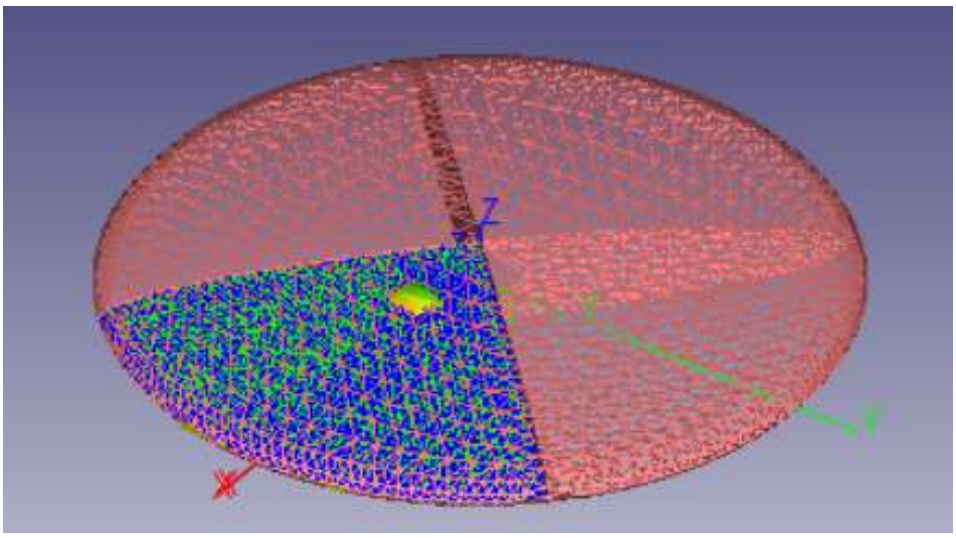


Рис. 6.31. Трассы отражающих лучей

Увеличьте ***Maximum Bounces*** до величины (0,3). Становятся видимыми сегменты бегущих лучей для этих отфильтрованных лучей (рис. 6.32).

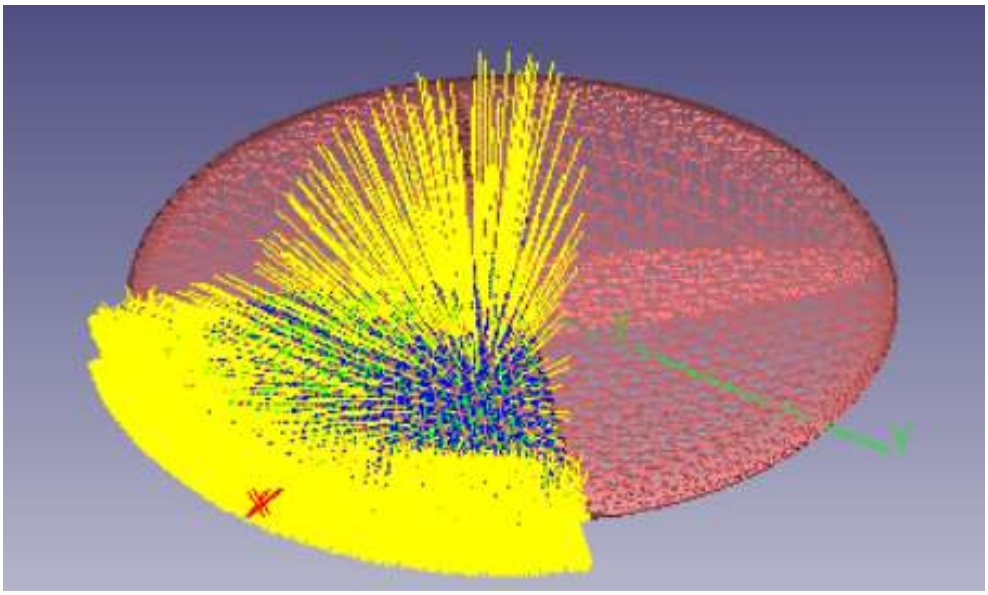


Рис. 6.32. Видимые отфильтрованные лучи

Дальнейшее увеличение отскоков ***Maximum Bounces*** до 4 и выше не дают никакого эффекта, так как для этой конфигурации линии лучей, которые уходят после первого отражения, имеют только три сегмента луча между ***Tx*** и исключает "***point***":

1. ***Tx*** -> ***Hit-Point 1.***
2. ***Hit-Point 1*** -> ***Hit-Point 2.***
3. ***Hit-Point 2*** -> ***Escape "Point".***

Единственное отражение, которое было отфильтровано (оставлено), используя ***By # of Reflections***, происходит в точке ***Hit-Point 1***.

Существует одна передача через область анализа в ***Hit-Point 2***, и в настоящее время мы не фильтруем линии лучей в зависимости от количества передач до ухода в пространство.

Отключите все фильтра перед дальнейшей работой

6.8.1 Применение фильтра приемника Rx для трассирования лучей дальнего поля

Выберите узел **SBR: Rx Filters.** Включите фильтр ***Rx Filter*** (рис. 6.23). Установите ***Receiver Type*** как ***Far-Field***. Установите ***Rx Elevation*** = 0, ***Rx Azimuth*** = 0. Установите ***Tolerance*** = 10%.

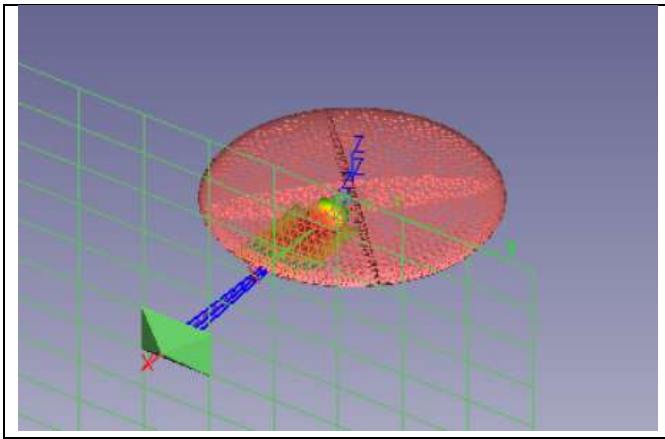


Рис. 6.23а. Установка сетки приемника Rx

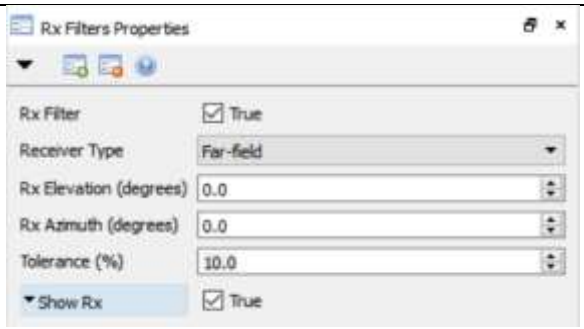


Рис. 6.23б. Опции фильтра лучей

Выберите ***SBR:Rendering***, и увеличите ***Line Width*** = 2, а также увеличьте длину ***Exit Ray Length*** = 20.

Зеленая сетка приемника теперь указывает угловое положение фильтра приемника ***Rx***, с отфильтрованными лучами, проходящими вблизи его центра. Так как это фильтр дальнего поля ***Rx***, приемник наблюдателя на самом деле находится бесконечно далеко. Вместо этого индикатор ***Rx*** помещается на расстояние конечного радиуса от источника в соответствии с заданной длиной выходного луча ***Length***, а также меридиональными углами ***Rx Elevation*** и азимутом ***Azimut***.

Выберите узел ***Windows: 3D-Scene: Near-Field*** и подстройте ***Transparency*** = 0.5. Теперь можно видеть лучи снизу плоскости обзора.

Выберите снова узел ***SBR:Rx Filters***. Подстройте ***Rx Elevation***, ***Azimuth*** используя стрелки

Рассмотрите, как отфильтрованные лучи трассируются маркером ***Rx***. Чтобы видеть многократные пучки лучей, установите ***Rx Azimuth*** = 0 и увеличьте ***Rx Elevation*** до величины около 20.

Сохраните увеличение ***Rx Elevation*** равным около 90°. На рис. 6. 24 параметр ***Rx Elevation*** = 64°.

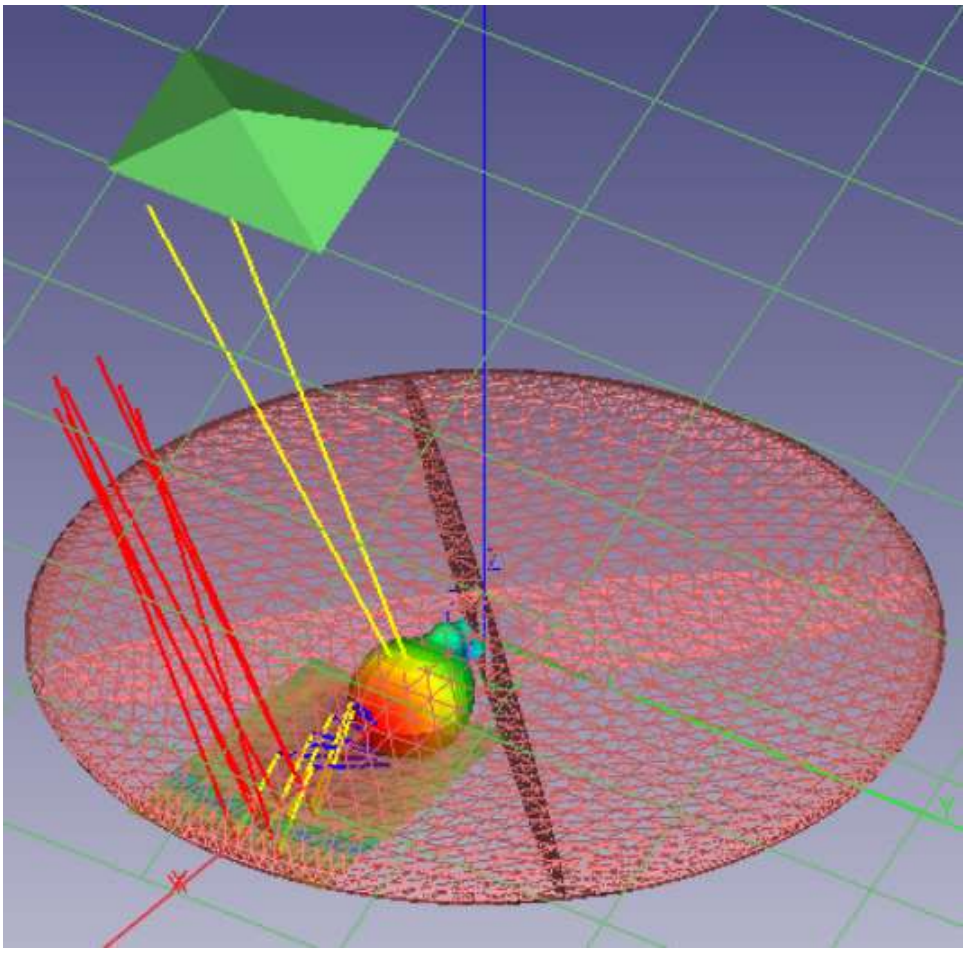


Рис. 6.24. Разделение лучей при фильтрации

6.8.2 . Применение фильтра ближнего поля Rx filter для просмотра лучей

Отключите ***Draw Exit Rays*** в узле ***Rendering*** (рис. 6.25). В узле ***Rx Filters*** установите ***Receiver Type*** на ***Near-Field (Custom)***. Установите положение приемника ***Rx Point*** на значение (2.5, 0.0, 0.0).

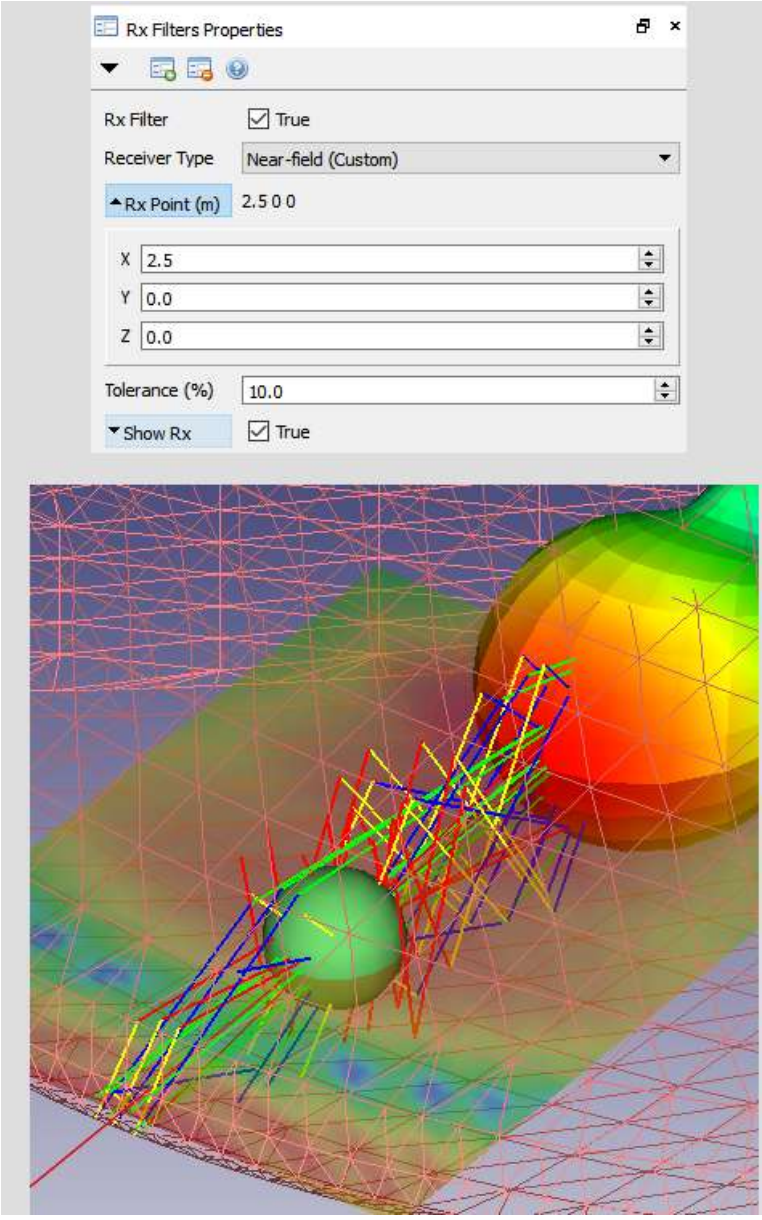


Рис. 6.25. Трассы лучей при настройке фильтра лучей

При фильтрации приемником $\boldsymbol{R_X}$ наблюдается ход лучевых трубок, которые пересекают точку приемника ***Rx***. Это не означает, что другие лучи в этих местах не влияют на моделирование. На самом деле, все лучи со всех точек падения, с ***SBR*** лучами, используются для "окрашивания" токов на поверхности (в соответствии с аппроксимацией физической оптики), которые затем дают излучения во все точки наблюдения при определении рассеянного поля. Фильтр $\boldsymbol{R_X}$ служит только для иллюстрации путей распространения лучей в точку приемника ***Rx*** (точку наблюдения), на основании метода геометрической оптики ГО.

Отключите фильтр ***Rx Filter***. Кликните кнопку ***Clear Rays*** в главном меню. Занесите вид по умолчанию (рис. 6.26) в окно ***3D–Scene***.

6.9 Использование плоскости сечения для просмотра интерьера области анализа

Выберите узел ***Scene*: *radome*** . Разверните папку панели ***Rendering*** и измените ***Render Mode*** на затененной плоскости ***Flat-Shaded***.

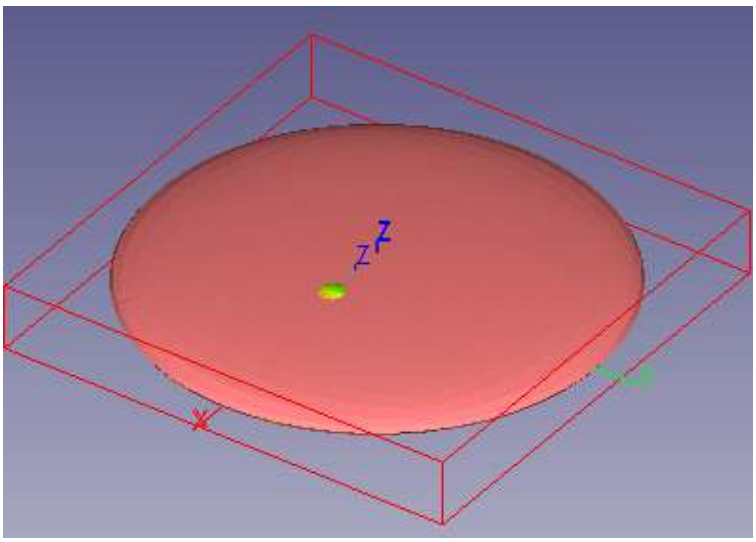


Рис. 6.26. Область излучения рупорной антенны

Кликните кнопку ***clipping-plane*** в окне ***3D–Scene***. Появляется диалог ***Clipping Plane*** (рис. 6.27).

Включите опцию ***Enable***. Для селектора ***Plane Orientation*** выберите +*Z*. Установите величину ***Plane Displacement* = 0.4**. Кликните кнопку ***Apply*** в диалоге рис. 6.27.

Теперь часть обтекателя срезана. Если Вы нажмете ***Enter*** во время ввода ***Plane Displacement***, сечение плоскости не выполнится. В этом случае откройте его еще раз, нажав кнопку ***Clipping Plane***.

Подстройте горизонтальный слайдер в панели ***Plane Displacement*** до величины около 0.1. Секущая плоскость в окне ***3D-Scene*** будет перестроена, как только вы сдвинули слайдер и отпустили кнопку мыши. Если это не получилось, кликните ***Apply***.

Подстройте плоскость сечения используя круглый верньер. Это даст более плавное управление, чем слайдер, в зависимости от установок, используя ***Vernier Precision***.

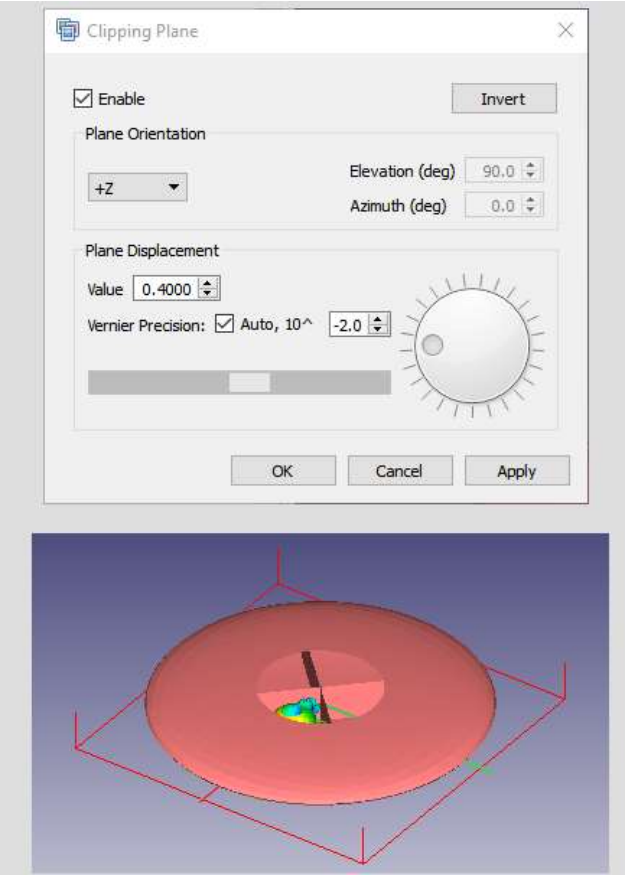


Рис. 6.27. Управление плоскостью сечения

Поэкспериментируйте с различными установками ***Plane Orientation***, чтобы ознакомиться с использованием функции плоскости сечения. Для изменения ориентации плоскости сечения нужно нажать кнопку ***Apply***, чтобы установка вступила в силу. Также попробуйте нажать кнопку ***Invert***; это простой способ переключить ориентацию плоскости сечения, не перемещая его. Отключите опцию ***Enable*** и кликните ***OK***.

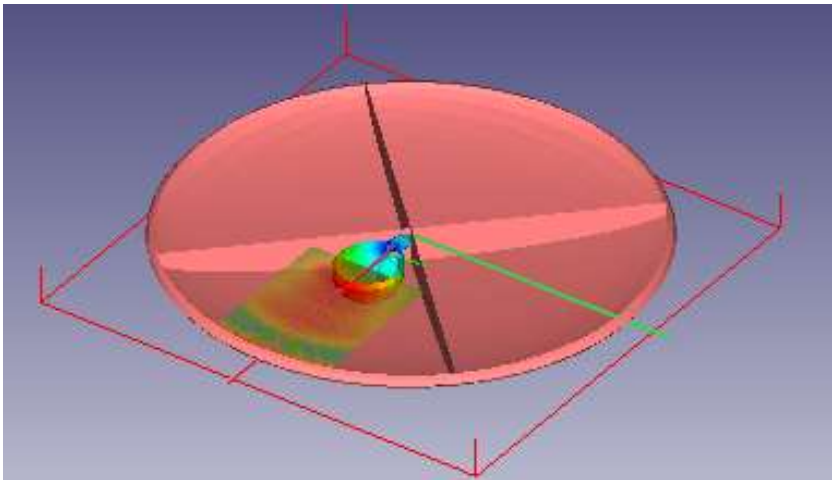


Рис. 6.28. Рупорная антенна, ближнее и дальнее поле в пространстве анализа

Этим завершается пример 4.

7 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Электромагнитная совместимость – это возможность работы нескольких радиоканалов без взаимных помех. В этом разделе рассчитывается широкополосная связь (развязка) между двумя антеннами, расположенными на самолете. Антенны моделируются вне своих рабочих диапазонов для захвата внеполосных каналов распространения, что важно при анализе электромагнитной совместимости ***EMI/EMC***. Одна из антенн находится внутри многослойного диэлектрического обтекателя, состоящего из нескольких слоев.

В этом примере (Пример 5) будет выполнено:

- Создание многослойного покрытия
- Интерактивное размещение антенны, используя привязку к точке
- Расчет широкополосной связи между антеннами, расположенными под углом

Шаги из этого примера:

1. Загрузка ***CAD*** модели самолета ***E-2C***.
2. Задание свойств материала для ***E-2C***.
3. Загрузка широкополосных источников тока и размещение их на корпусе ***E-2C***.
4. Загрузка широкополосной ДН рупорной антенны и размещение ее в пространстве анализа самолета ***E-2C***.
5. Установки на анализ электромагнитной совместимости.
6. Запуск моделирования и вывод результатов.

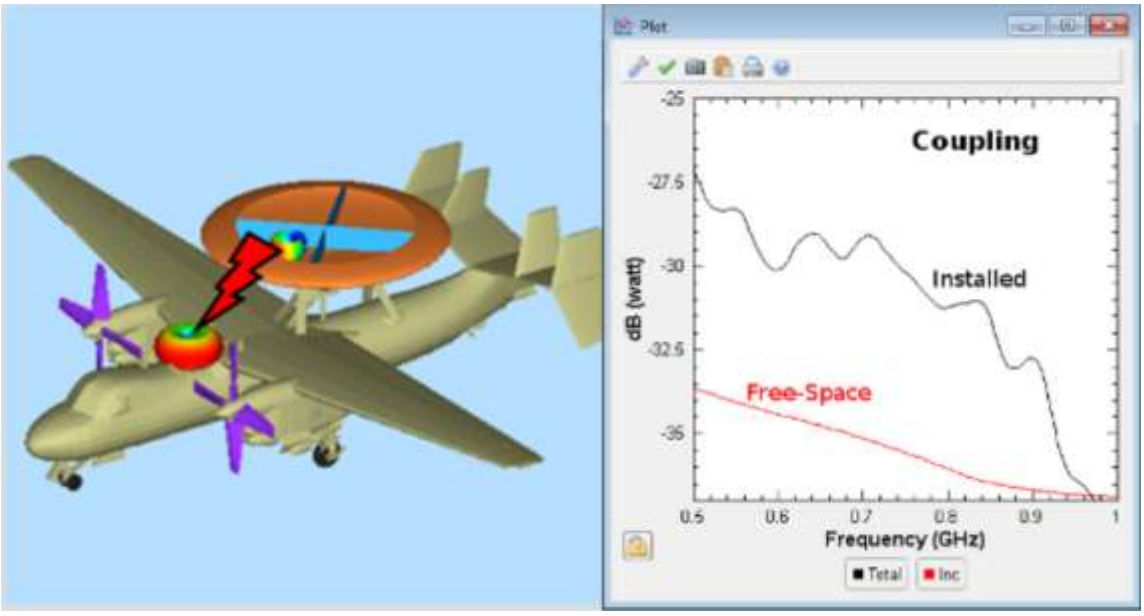


Рис. 7.1. Связь между антеннами, расположенными в свободном пространстве (***Free-Space***) и на самолете (***Installed***)

7.1 Загрузка модели самолета E-2C, состоящей из фасок

Запустите ***Savant*** и командой «***Insert Model***» загрузите модель самолета ***Tutorial5/E-2C.facet***.

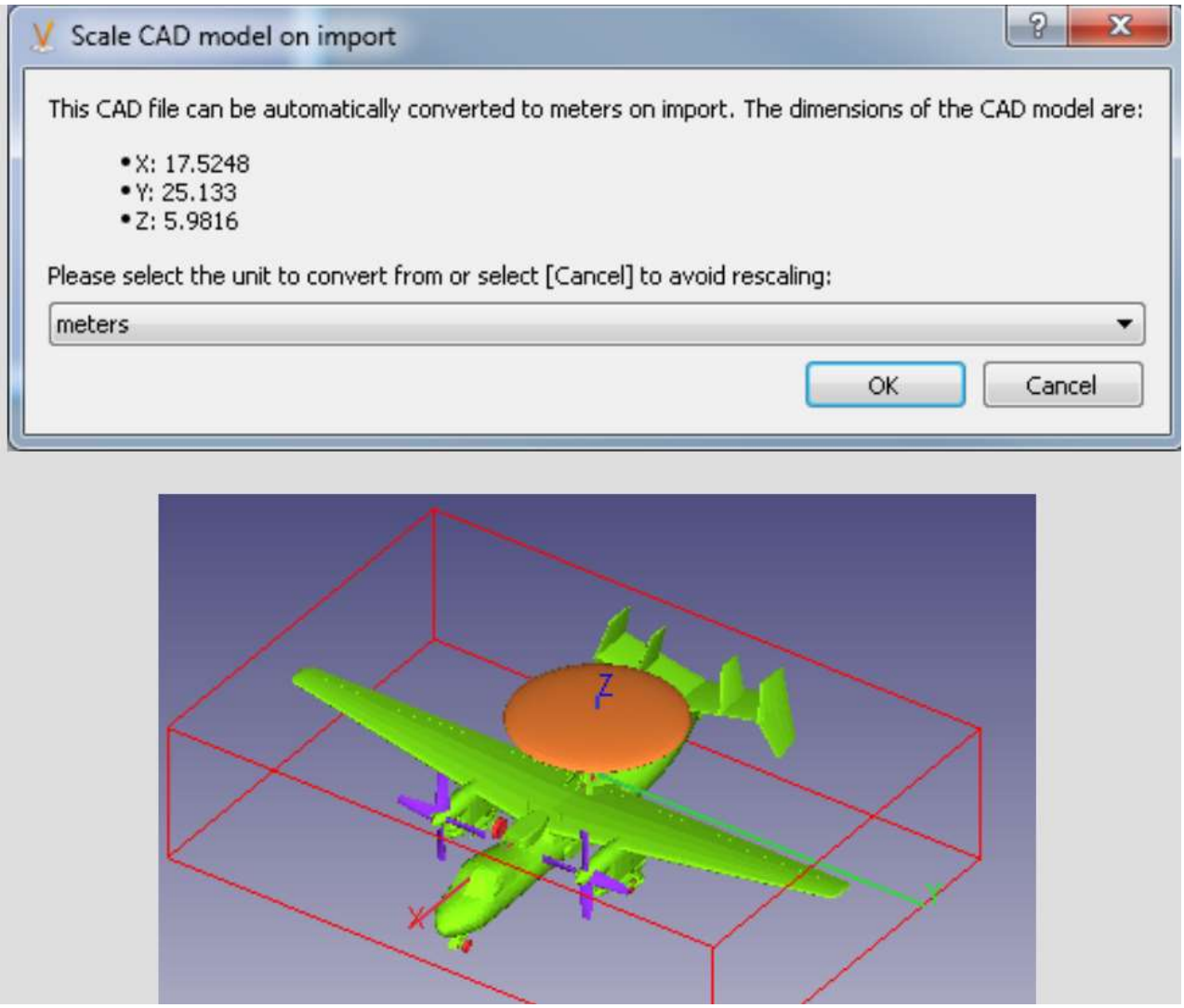


Рис. 7.2. Самолет E-2C с двумя антеннами

Для создания материального покрытия модели самолета, выберите узел ***E-2C*** в дереве проекта. Разверните папку **Rendering** и установите опцию ***Render Mode*** как ***Wire-Frame***. Установите ***Color by*** для модели ***Entire Model***.

Разверните узел ***Materials*** и затем узел ***Index Coatings***. В модели имеется пять разных покрытий (рис. 7.3).

Выберите каждый узел ***Coat Index***, наблюдая, какая часть CAD-модели соответствует этому покрытию.

Рис. 7.4 соответствует ***Coat Index 1*** (корпус самолета и крылья). ***Coat Index 5*** служит для шин шасси.

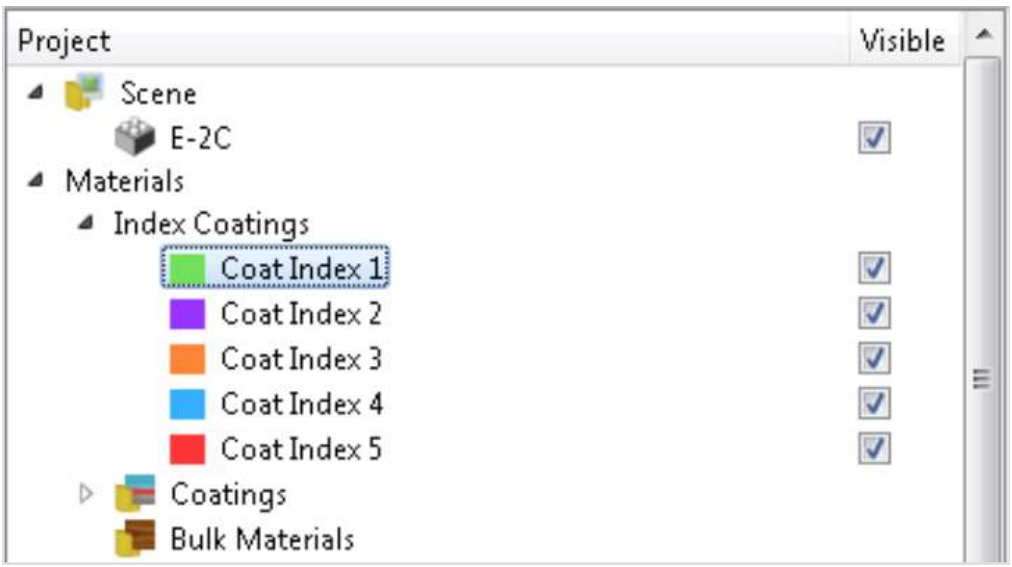


Рис. 7.3. Узел индексов покрытий

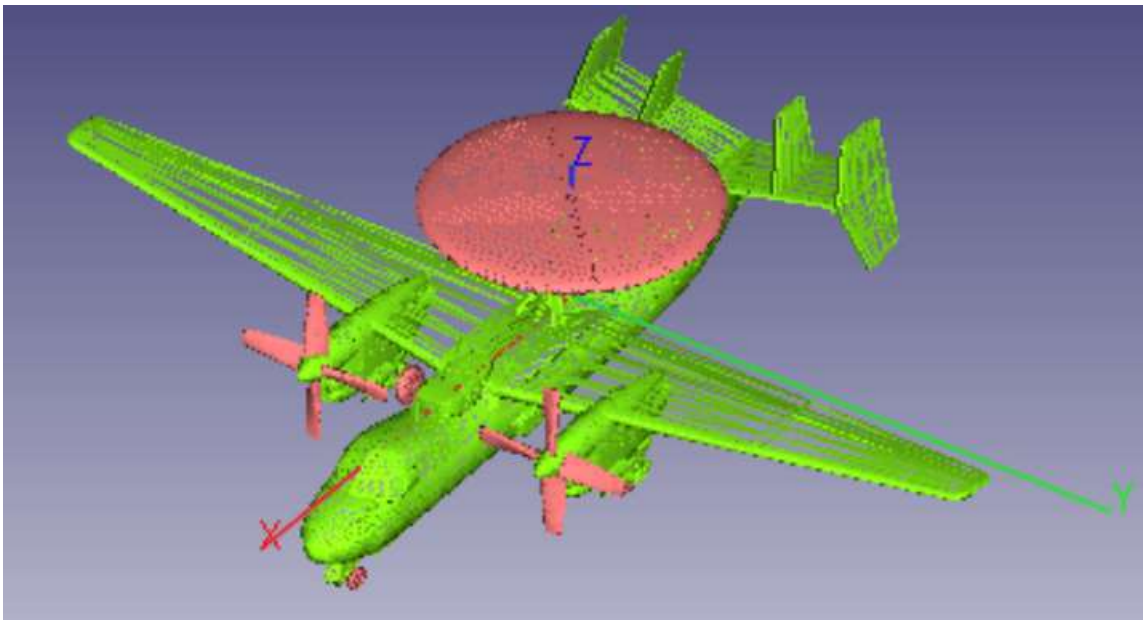


Рис. 7.4. Модель самолета со сложным покрытием

В таблице ниже приведены индексы покрытия и типы материалов, которые соответствуют этим покрытиям.

Coat Index	***E-2C Part***	***Тип покрытия***
1	Корпус самолета	Металл (***PEC***)
2	Пропеллеры	Диэлектрический слой над металлической поверхностью
3	Поверхность области	***Penetrable*** многослойный

	анализа обтекателя	диэлектрический сэндвич
4	Внешняя поверхность обтекателя	***Perfect Absorber*** (идеальный поглотитель)
5	Шины шасси	***Penetrable*** однослойный диэлектрик

В главном меню дважды кликните кнопку ***Undo*** для возвращения установок ***Render Mode*** и ***Color by*** к исходным значениям (***Flat-shaded*** и ***Coating index***). Сохраните проект ***Tutorial5.savant*** в директории ***Tutorial5***.

7.2 Задание свойств материала покрытия

Задайте многослойный диэлектрический «сэндвич» для обтекателя антенны, для чего кликните кнопку *Add Coating* в главном меню. Появляется новый узел ***Coat1***, под узлом ***Materials***: ***Coatings*** (рис. 7.5).

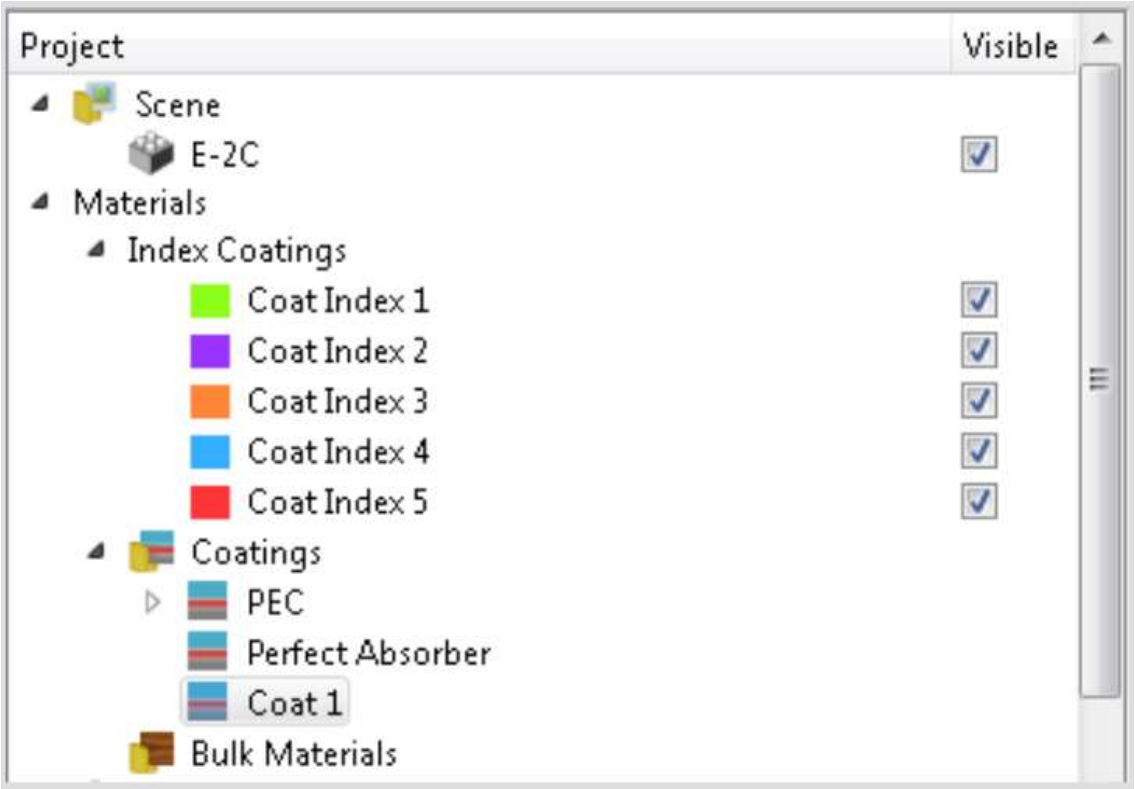


Рис. 7.5. Узел типов покрытий

Переименуйте узел ***Coat 1*** как ***Honeycomb***.
В панели свойств ***Honeycomb*** установите ***Coating Type*** на ***Dielectric Layers***. Кликните кнопку ***Add Layer*** в панели свойств. Узел ***Layer 1*** добавляется под узлом ***Honeycomb***. Это узел диэлектрического слоя с заданной толщиной и характеристиками материала (рис. 7.6).

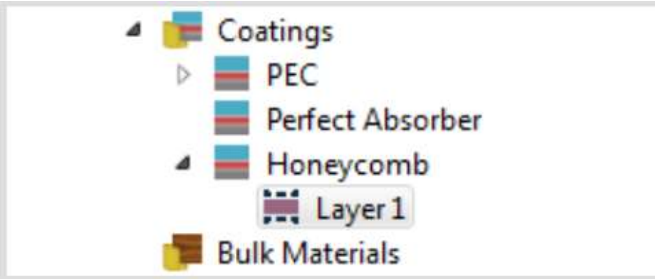


Рис. 7.6. Создание нового узла покрытия

Установите свойства материала первого слоя как на рис. 7.7.

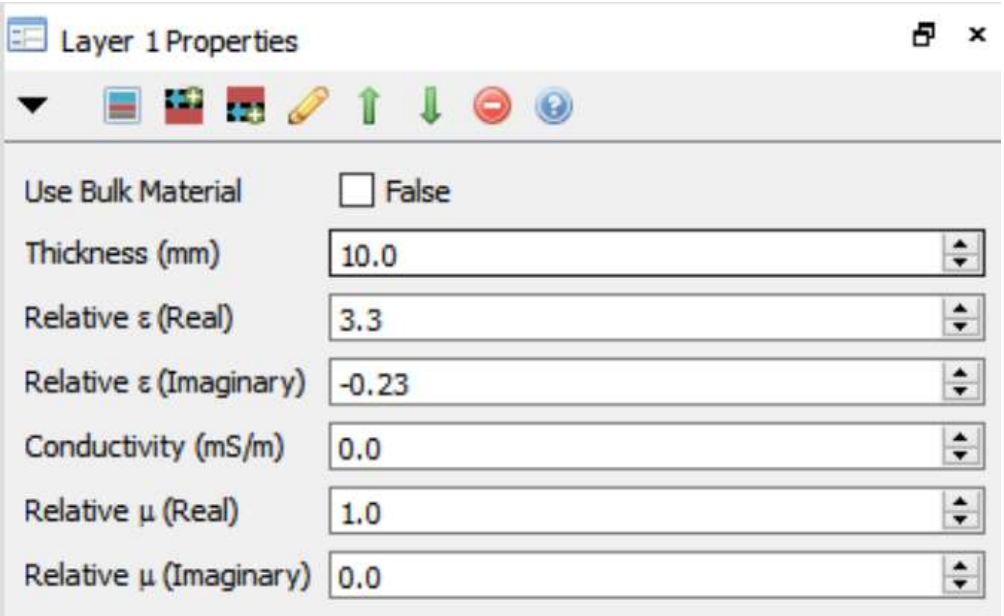


Рис. 7.7. Задание характеристик диэлектрического слоя 1

Savant имеет библиотеку материалов (**B*ulk***), которая позволяет определить материал, который может использоваться в одном или нескольких слоях покрытия. Это удобно при создании многих типов покрытий, которые повторно используют одни и те же типы материалов в своих слоях. Но мы не будем использовать библиотеку материалов в этом примере.

Электрические потери материала могут быть охарактеризованы мнимой составляющей относительной проницаемости (ε_r) или проводимостью. Эти два варианта не предусмотрены, так как они по разному меняются с повышением частоты. В этом примере мы будем использовать мнимую часть ε_r для учета диэлектрических потерь и всегда устанавливаем проводимость равной нулю.

Кликните кнопку ***Add Layer Below*** в панели свойств ***Layer 1***. Снизу слоя ***Layer 1*** появляется слой ***Layer 2***. Установите для слоев характеристики материалов, показанные на рис. 7.8.

Выберите узел ***Honeycomb***. Кликните кнопку ***Material Layers Window*** в инструментальной панели. Открывается окно ***Material Coating Layers*** (рис. 7.8) с таблицей многослойного диэлектрика.

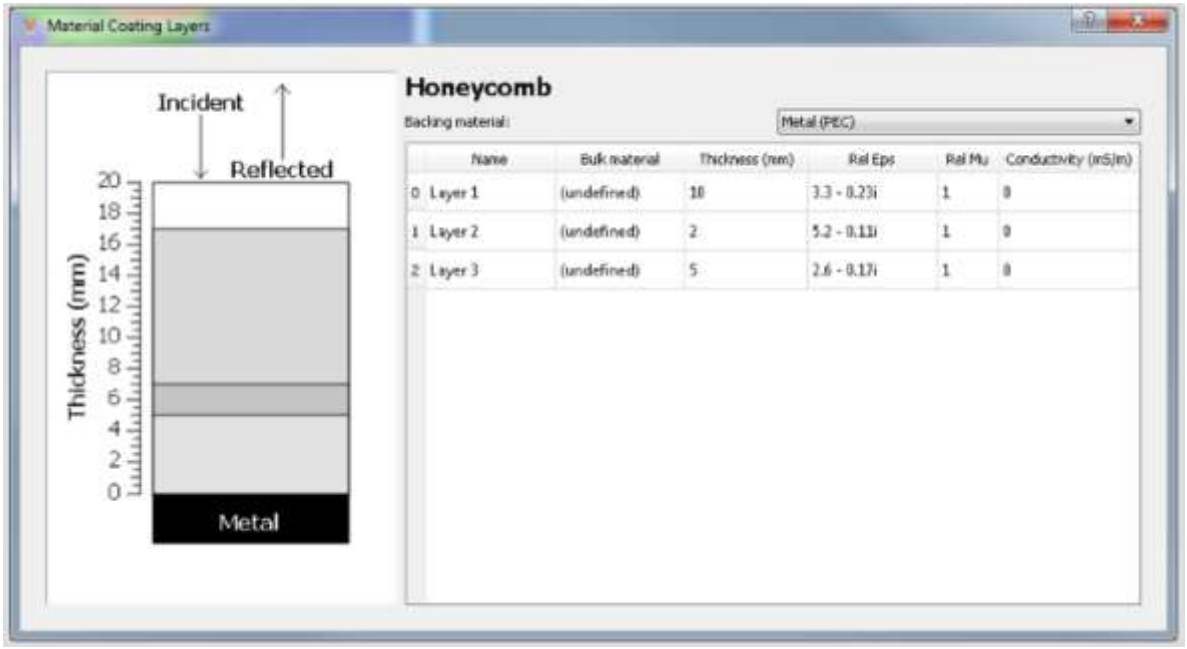


Рис. 7.8. Диалог комбинаций диэлектрических слоев

Рисунок слева на рис. 7.8 показывает путь передачи лучей в диэлектрических слоях. Диаграмма показывает, какой слой является внешним, а какой внутренним. Ответ зависит от того, с какой стороны от поверхности падают лучи. Лучи всегда падают на первый слой (т.е. на первом дочернем узле покрытия), который по умолчанию называется слоем 1, а прошедшие лучи всегда выходят из последнего слоя.

В этом окне, установите ***Backing Material*** на ***None (Penetrable Coating)***. Получается рис. 7.9.

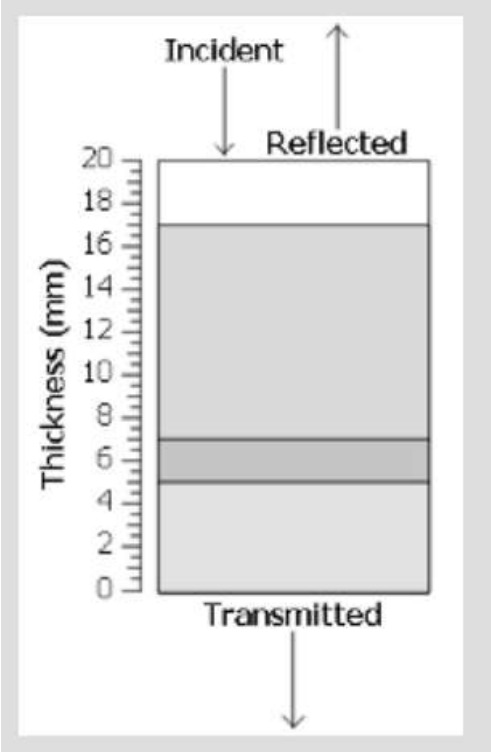


Рис. 7.9. Падающие, отраженные и прошедшие лучи через многослойный диэлектрик

Выберите верхний серый слой в диаграмме (рис. 7.10). Стрелка указывает на середину слоя, и слой ***Layer 1*** высвечивается в таблице. Заметим, что этот слой также выбирается в дереве проекта.

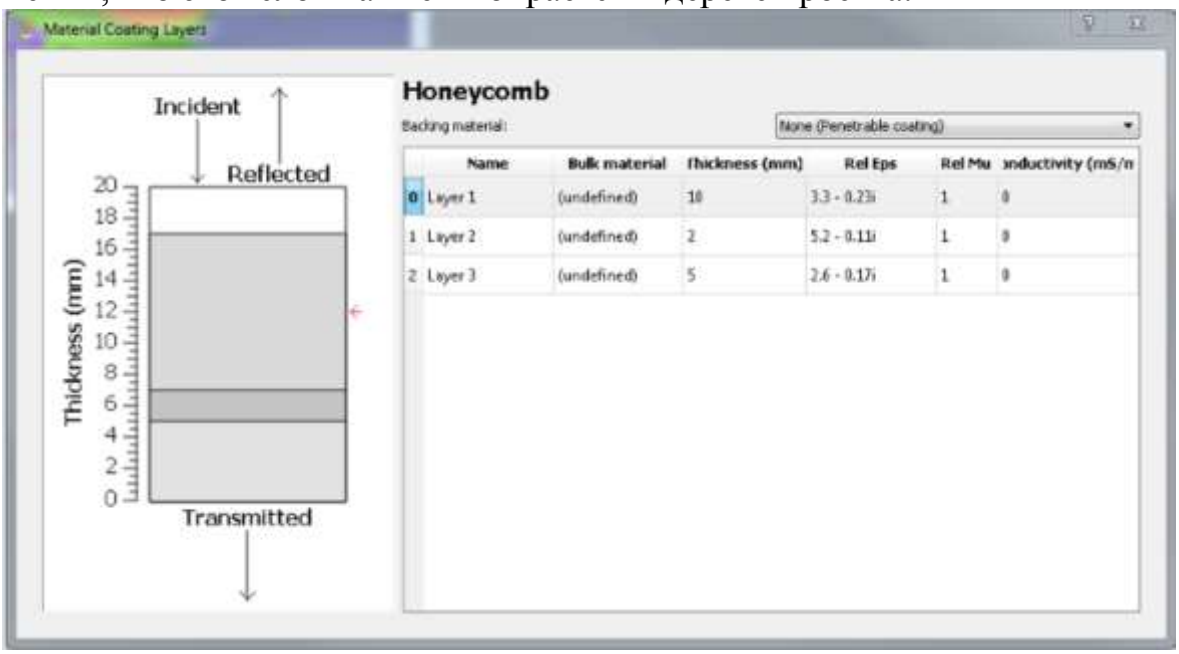


Рис. 7.10. Параметры слоев диэлектрического «сэндвича»

Толщины слоев может быть подстроены с помощью введения данных в таблице на границах между слоями. Занесите толщины слоев ***Layers 1***, ***2***, и ***3*** равными 10, 2, и 5 мм, устанавливая их в панели свойств этих слоев. Закройте окно ***Material Coating Layers***.

Зададим сотовое (***honeycomb***) покрытие, хотя мы еще должны создавать их в области анализа.

5.2.2 Использование покрытия *Honeycomb* в пространстве *E-2C*

Выберите узел ***E-2C CAD***. Установите ***Render-Mode*** как ***Wire-Frame***. Установите ***Color*** *как* ***Entire Model***

Выберите узел в дереве ***Materials***: ***Coatings***: ***PEC***: ***Coat Index 3*** (поверхность области ***radome***). Нажмите и перетащите этот узел ниже ***Honeycomb***.

5.2.3. Задание покрытий для всех частей самолета *E-2C*

Coat Index	***Части самолета E-2C***	***Тип покрытия***
1	Тело самолета	Металл (***PEC***)
2	Пропеллеры ***Propeller Blades***	Диэлектрический слой над металлической поверхностью

3	***Radome Surface***	многослойный диэлектрический сэндвич
4	Внешняя поверхность поверхности обтекателя	Идеальный поглотитель
5	Колеса	***Penetrable*** однослойный диэлектрик

Создайте новый узел ***Coating*** и выберите ***Coating Type*** как ***Single Layer Dielectric***. Он получит имя по умолчанию ***Coat 1***.

Нажмите и перетащите узел ***Materials*: *Coatings*: *PEC*: *Coa Index 2*** (лопасть винта) под вновь созданный узел ***Coat 1.***

Задайте свойства узла ***Coat 1*** как показано на рис. 7.10.

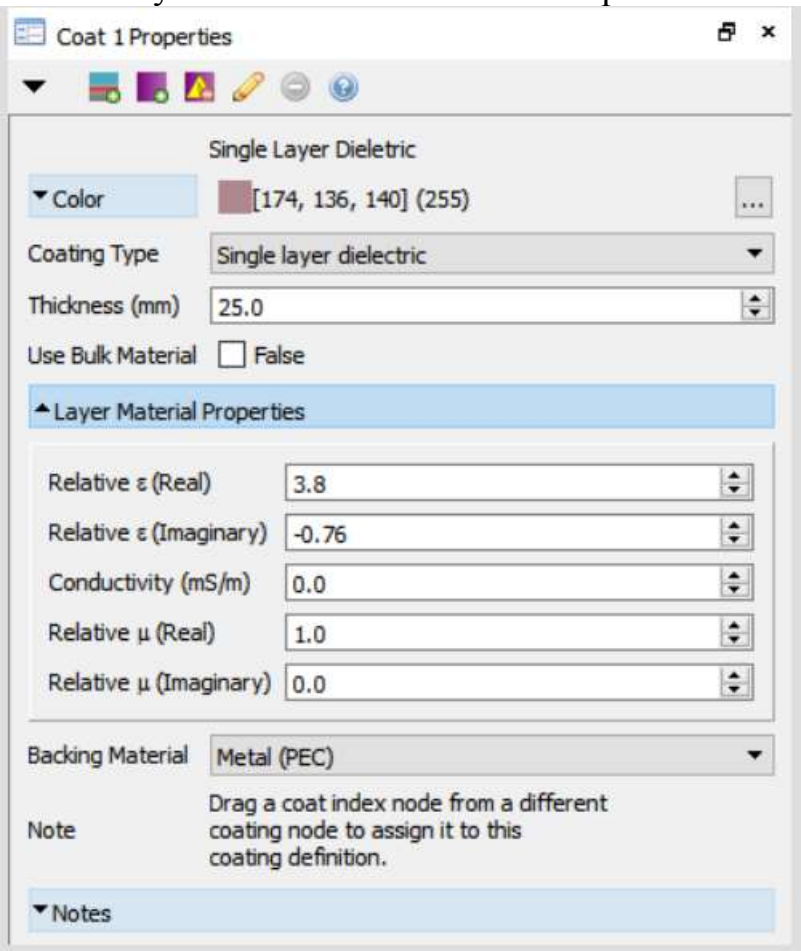


Рис. 7.11. Задание характеристик покрытия

Здесь мы используем удобное свойство, которое позволяет задать однослойный диэлектрик непосредственно в узле ***Coating*** без добавления каких-либо дополнительных слоев.

Мы установили мнимую компоненту (потери) относительной проницаемости (***Relative ε***) достаточно высокой. Покрытия с потерями иногда применяются к пропеллерам, чтобы уменьшить их рассеяние и результирующие эффекты модуляции.

Нажмите и перетащите узел: ***Coatings*: *PEC*: *Coat Index 4*** (обтекатель внутри) вниз ***Materials*: *Coatings*: *Perfect Absorber***

Вы должны видеть его цвет через проволоку-каркас поверхности обтекателя.

Создание нового покрытия ***Coatings*** и установка его типа ***Coating Type*** как ***Single Layer Dielectric***. Он будет описан как имя по умолчанию ***Coat 2***.

Нажмите и перетащите узел ***Materials*: *Coatings*: *PEC*: *Coat Index 5*** (колеса) под вновь созданный узел. Вращайте самолет ***E-2C*** и увеличьте его, чтобы увидеть нижнюю подложку и высветить цвет колес. Кликните кнопку ***Default View*** после завершения:

Задание следующих свойств покрытия ***Coat 2***:

Толщина: 25.0 mm

Проницаемость ε = 2.3 –j0.02

Проводимость: 0

Магнитная проницаемость μ = 1+j0

Backing Material: None (Penetrable Coating)

Мы применили много материальных настроек. Мы рекомендуем вернуться и проверить их все, включая определение покрытия ***Honeycomb***.

Измените вид модели ***E-2C CAD Render Mode*** обратно к виду ***Flat-Shaded***. Измените ***Color by*** на ***Coating Type***. Самолет показывается в сером цвете (металл), тогда как обтекатель, винты и шины показаны в цвете, определенные в узле покрытия ***Coating*** (рис. 7.11).

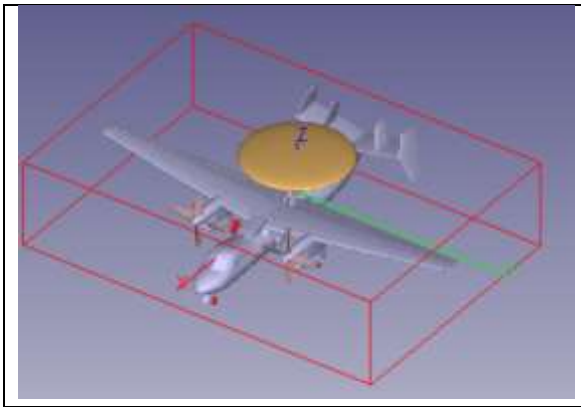
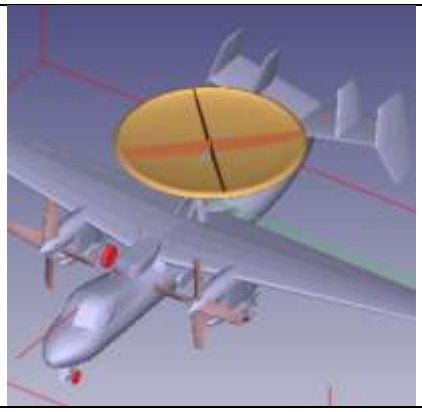
	

Рис. 7.11а. Выделение цветом отдельных элементов самолета	Рис. 7.12б. Вскрытие верхней плоскости области с помощью плоскости сечения

Кликните кнопку ***clipping-plane*** в верхней линии окна ***3D – Scene***. Установите следующие свойства плоскости сечения:

Enable: On

Plane Orientation: +Z

Plane Displacement: около 2.7

Кликните ***Apply***.

Внутренняя структура области распространения (***radome***) теперь видима и окрашена коричневым цветом (идеальный поглотитель).

Снимите опцию ***Enable***, чтобы отключить секущую плоскость сечения и нажмите ***OK***. Сохраните проект.

7.3 Загрузка широкополосного источника антенны для монопольной антенны и размещение его на корпусе *E-2C*

Кликните кнопку ***Add Antenna from File...*** в главном меню. Выберите ***Tutorial5/500MHz_csrc.csrc***. Разверните панель папки ***Antenna Information*** для ***500MHz_csrc*** (рис. 7.13).

Провод монопольной антенны представляется как пара вертикальных источников тока, заданных в диапазоне частот от 0.5 до 1.0 GHz в 20 шагах (21 частотная выборка).

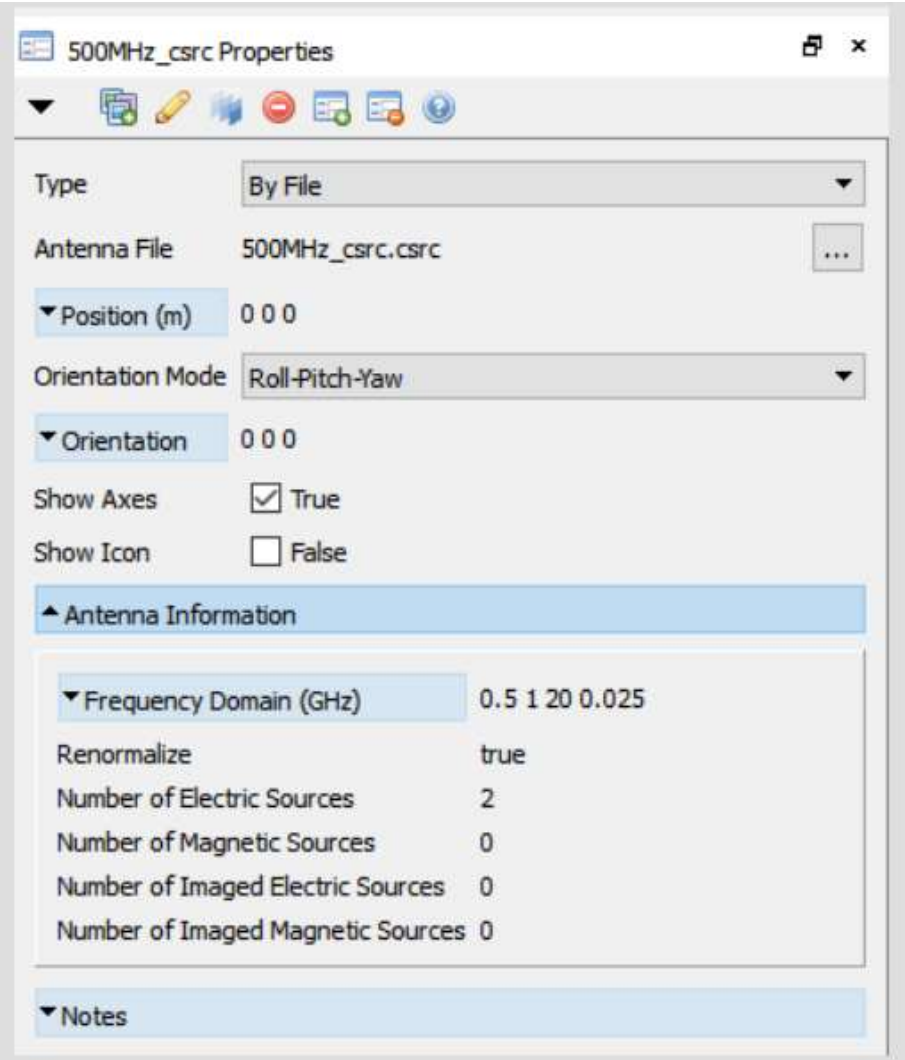


Рис. 7.13. Характеристики антенны в виде источника тока

7.3.1 Визуализация источников тока

Дважды нажмите на узел ***500MHz_csrc***. Появится окно, показывая источники тока для этой антенны. Увеличьте и подстройте окно ***3D - 500MHz_csrc*** так, чтобы два источника тока были ясно видны

Разверните узел ***500MHz_csrc*** и выберите его дочерний узел ***Current Sources.*** Увеличьте длину ***Length*** до величины около 0.25 (рис. 7.14).

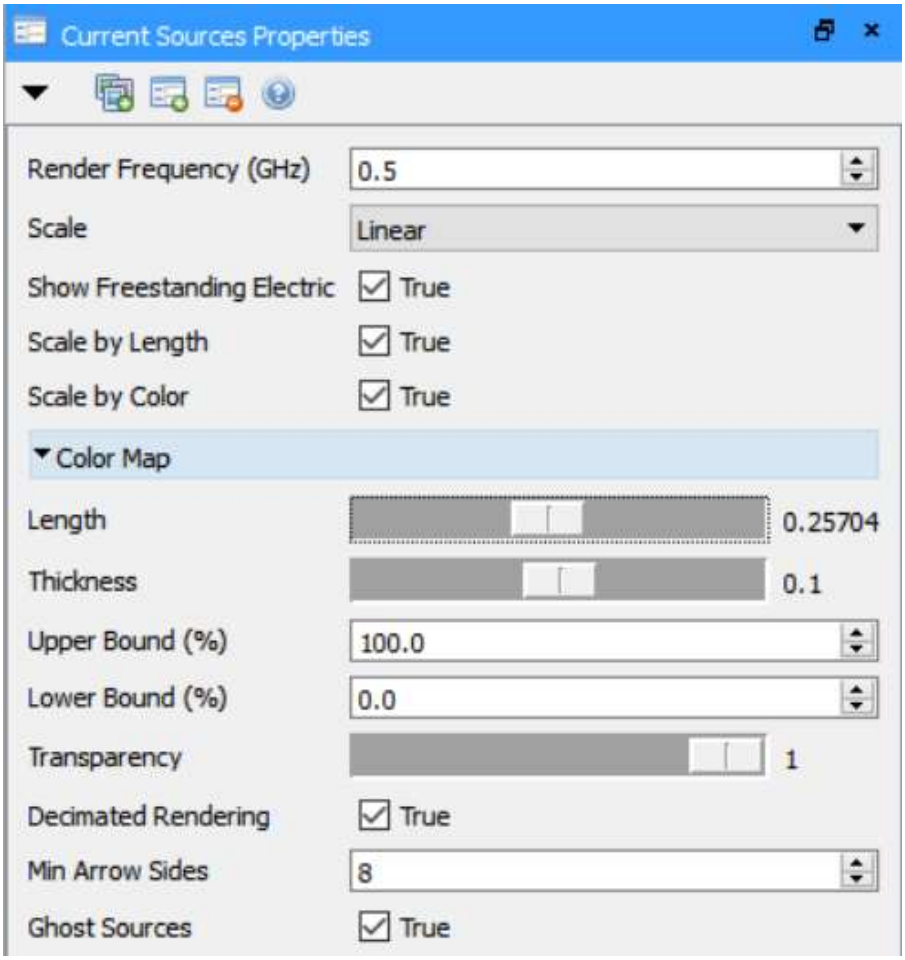


Рис. 7.14. Увеличение длины источника

Подстройте частоту ***Render Frequency***, используя движок и стрелку. Наблюдайте (рис. 7.15), как цвет двух источников тока изменяется с частотой. Изображения соответствуют частотам 0.5, 0.75, и 1.0 GHz, слева направо.

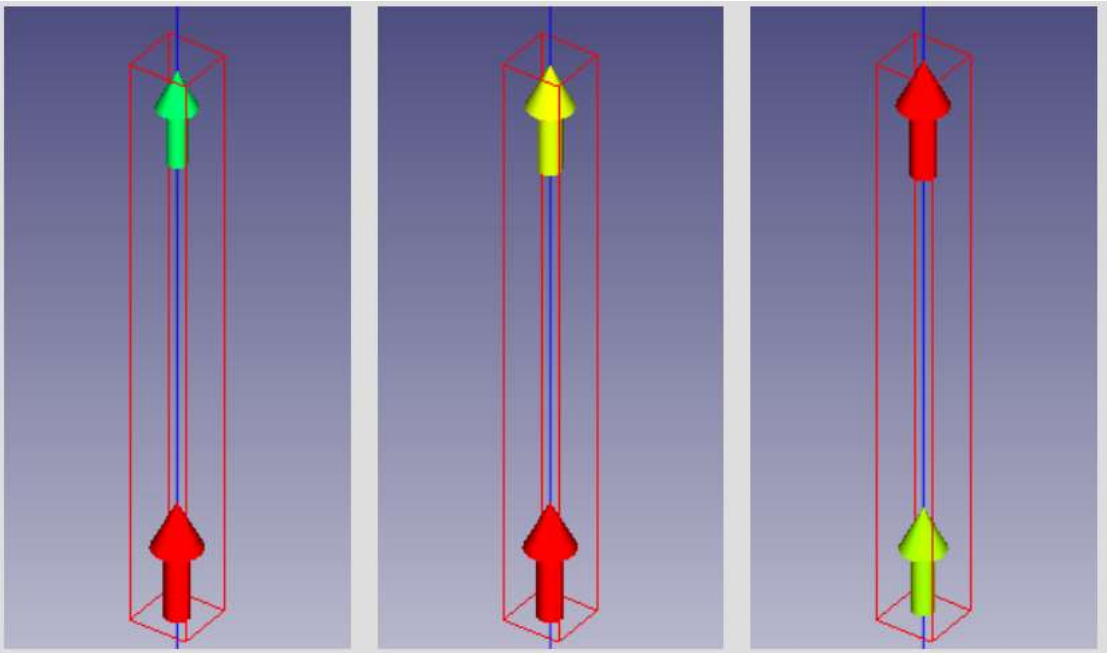


Рис. 7.15. Источники тока возбудители

Установите ***Render Frequency*** снова равным 0.5 GHz. Включите видимость узла ***500MHz_csrc: Pattern***, установив опцию ***Visibility*** в дереве проекта. Антенна в виде проводного тока меняет свой вид в соответствии с затененной ДН антенны, с еще видимыми стрелками источника тока. (рис. 7.16). Выберите узел ***Pattern.***

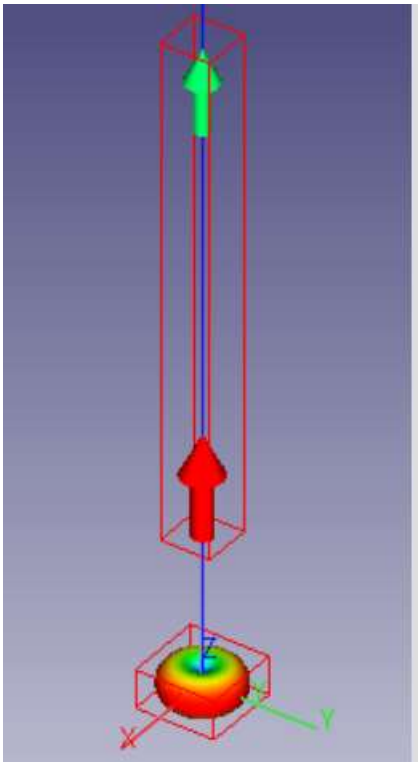


Рис. 7.16. ДН и источник тока антенны

Закройте окно ***3D - 500MHz_csrc***. В окне ***3D - Scene***, можно видеть ДН монопольной проволочной антенны и она слишком большая. В узле ***500MHz_csrc: Pattern***, подстройте ***Size*** равным около 0.003.

7.4 Внесение антенны на поверхность самолета

Увеличьте фрагмент корпуса самолета показанный на рис. 7.17.

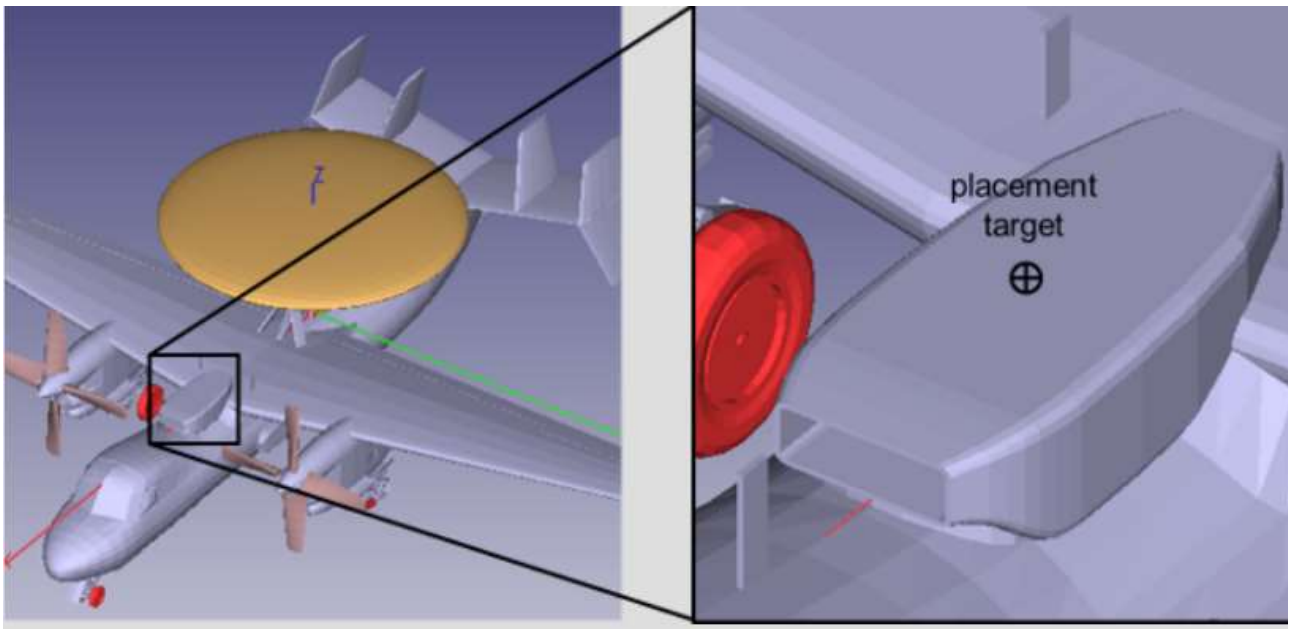


Рис. 7.17. Сдвиг антенны в целевую точку корпуса

Убедитесь, что узел ***500MHz_csrc*** выбран в дереве. В окне ***3D - Scene*** кликните иконку ***Place Object*** так, что она высветится.

Сдвиньте точку мыши приблизительно в точку, обозначенную как ***"placement target"*** (рис. 7.17).

Удерживайте клавишу ***Ctrl*** и кликните левую кнопку мыши.

Антенна должна быть сдвинута в точку ***Position*** и в панели свойств должно произойти переключение к режиму относительного положения (***Show Relative Coordinates***). Если это не так, пробуйте снова сдвинуть положение (***next***).

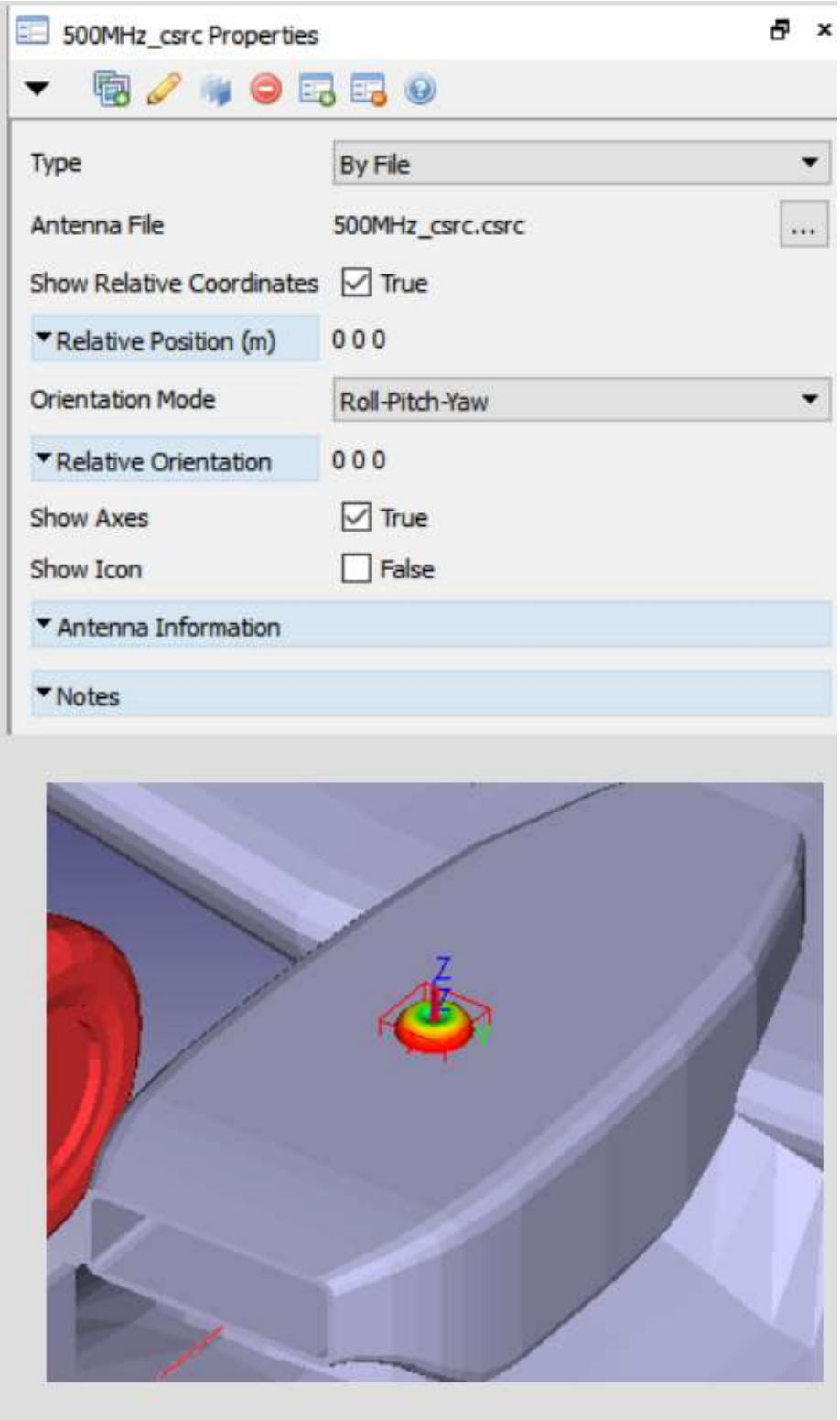


Рис. 7.18. Новое положение антенны на корпусе самолета

Отключите ***Show Relative Coordinates***. Разверните папку позиций ***Position*** и установите положение антенны на (4.75,0,0.328) м.

Выберите снова узел ***Pattern***. Установите ***Render Mode*** на ***Wire-Frame***. Сделайте увеличение антенны так, чтобы начало координат было ясно видно (рис. 7.19).

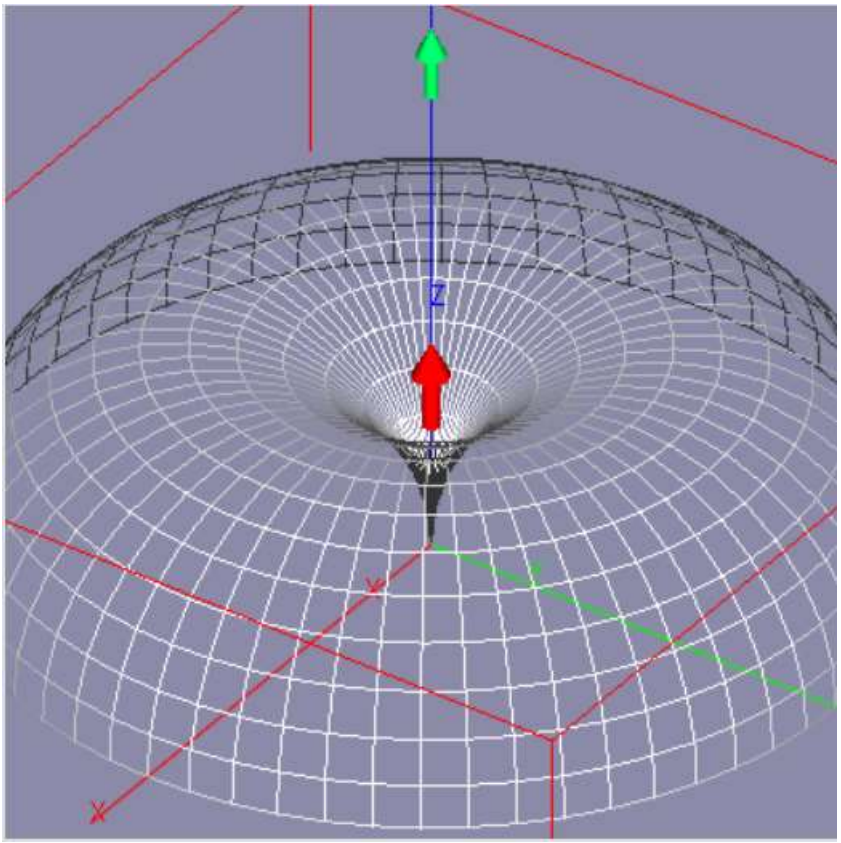


Рис. 7.19. ДН антенны

Сделайте небольшую подстройку координаты ***Z*** в ***Position***, пока начало координат его осей не соединятся с поверхностью корпуса.

Способ создания источников тока соответствует установлению провода монопольной антенны. Для антенны с двумя источниками тока, рассчитанными методом моментов, провод устанавливается на бесконечной земляной плоскости. Здесь мы устанавливаем эти токи на конечной земляной плоскости. Здесь нужно установить точку излучения в положение Z = 0.3276 м (рис. 7.21). Исправьте это для установки нового положения антенны (рис. 7.22).

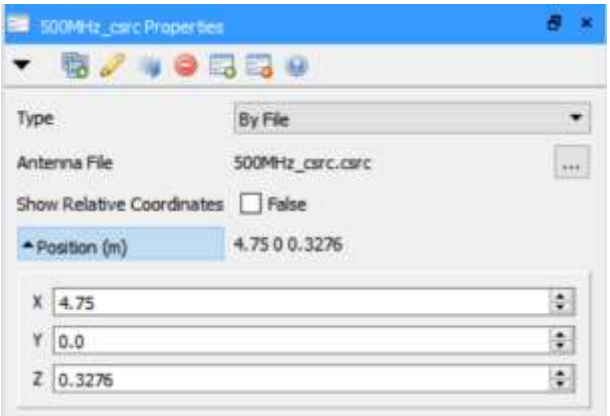


Рис. 7.20. Координаты положения антенны

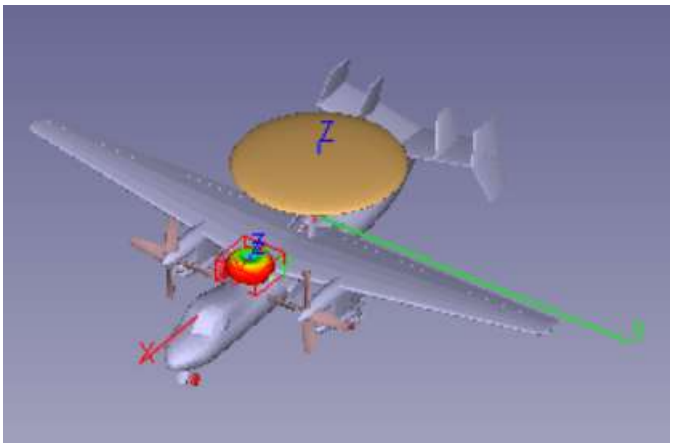


Рис. 7.21. Новое положение антенны

Измените тип ДН антенны ***Render Mode*** обратно к ***Flat-Shaded***. Подстройте размер ДН ***Size*** равным около 0.03 (рис. 7.21).

7.5 Загрузка широкополосной ДН рупорной антенны и размещение ее в пространстве *E-2C*

Добавьте антенну ***Tutorial5/horn_1GHz.patdat***, в проект. Разверните панель ***Antenna Information*** для ***horn_1GHz***. Видим, что характеристики заданы от 10 MHz до 1.5 GHz в 49 шагах частоты. Рупорная антенна рассчитана для работы в полосе от 750 МГц до 1,5 ГГц, но её характеристики излучения определены и ниже этой полосы.

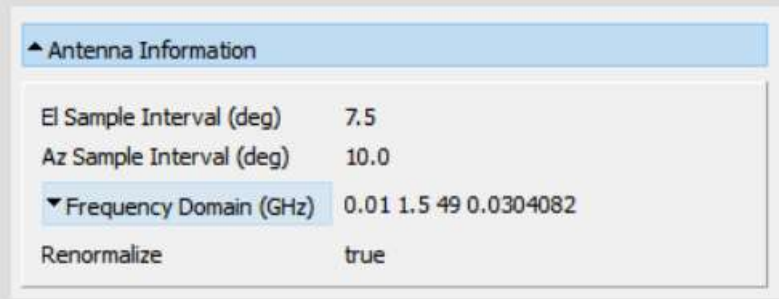


Рис. 7.22. Вывод окна информации об антенне

Откройте окно вида, дважды нажимая на узел ***horn_1GHz***. Рупор появляется в виде его ДН на частоте 10 MHz, самой нижней частоте диапазона.

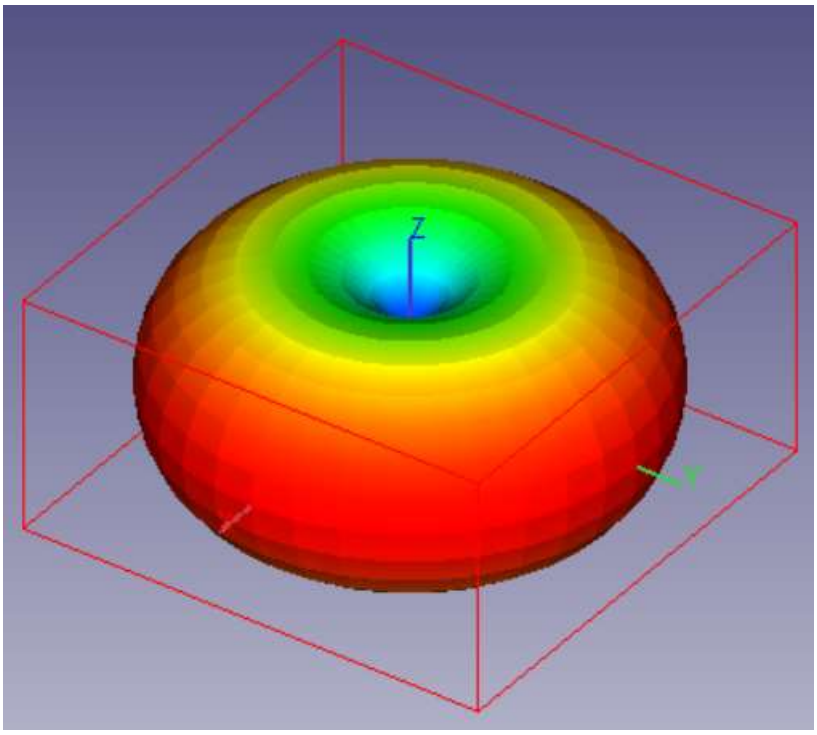


Рис. 7.23. ДН рупорной антенны на частоте 10 МГц

Разверните узел ***horn_1GHz*** и выберите его под-узел ***Pattern***. Включите ***Color by Field Strength***. Установите ***Scale Type*** на ***Decibel***.

Установите ***Size*** на величину около 0.015. Это не произвело никакого эффекта в специальном окне.

Установите ***rendering Frequency*** = 1.0 GHz. Это покажет ДН как на рис. 7.24.

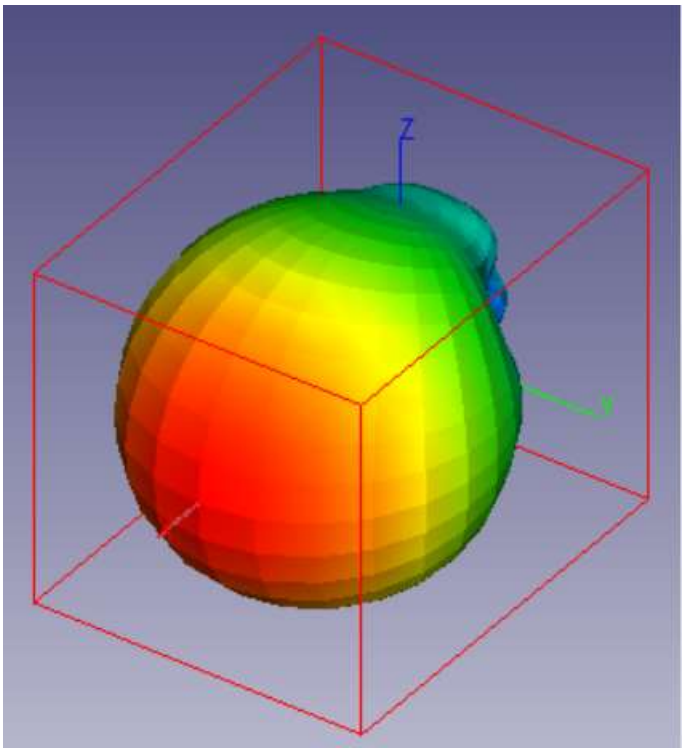


Рис. 7.24. ДН рупорной антенны на частоте 500 МГц

7.5.1 Сечение просмотра внутреннего интерьера области анализа.

Выберите окно ***3D - Scene***. Откройте окно плоскости сечения (ножницы). Включите ***Enable*** и становите ***Plane Orientation*** на +*Z*. Установите ***Plane Displacement*** на 2.85 и кликните ***Apply***. Пространство ***radom*** раскрывается (рис. 7.25).

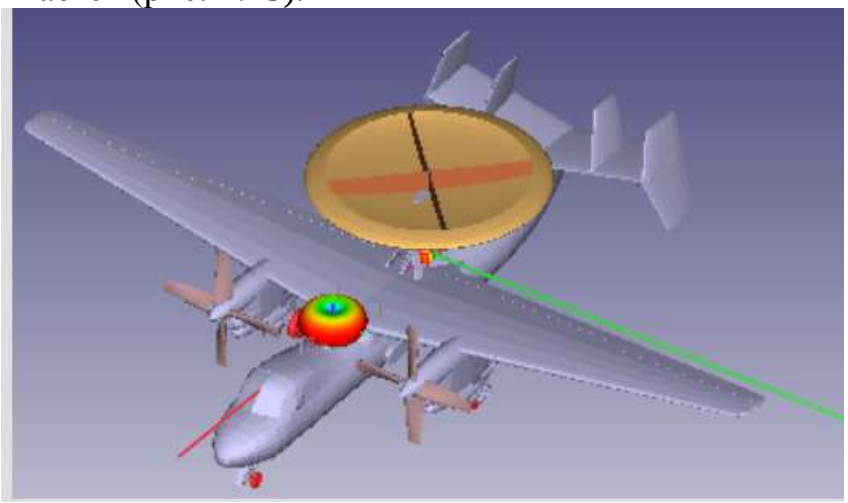


Рис. 7.25. Установка положения рупорной антенны в области анализа

7.5.2 Размещение рупорной антенны внутри области анализа

Установите положение ***Position*** для ***horn_1GHz*** на (1.0, 0.0, 2.55) м. Увеличьте место размещения рупорной антенны.

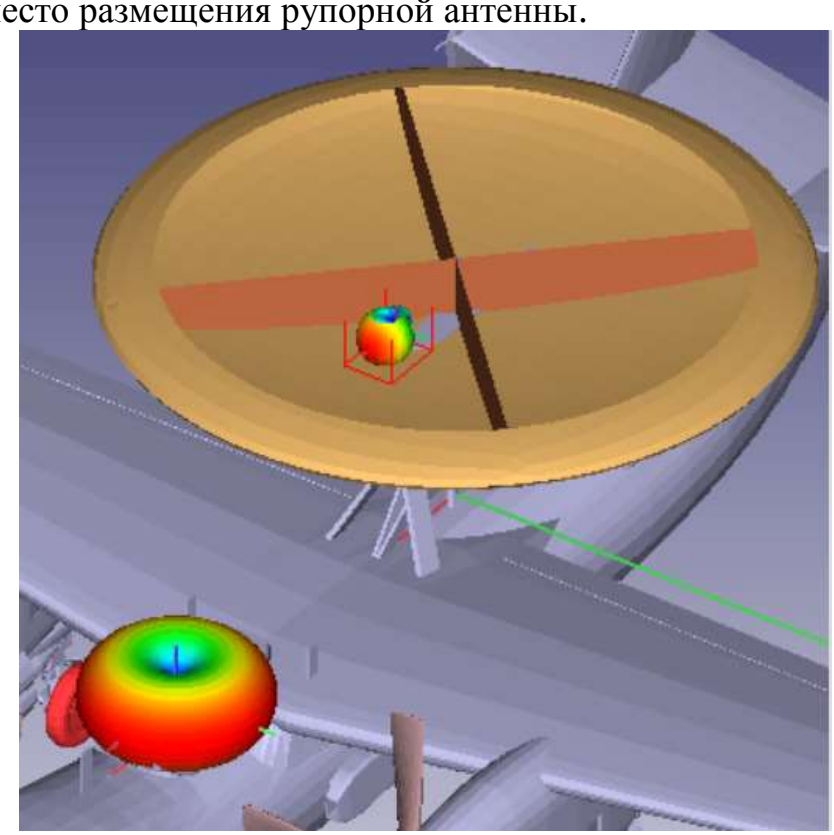


Рис. 7.26. Две антенны на одной платформе

Снимите опцию ***Enable***, чтобы отключить секущую плоскость и нажмите ***OK***. Сохраните проект.

7.6 Выбор установок на анализ

Выберите узел ***Analysis***. Установите режим расчета ***Analysis Type*** как ***Antenna-to-Antenna Coupling*** (рис. 5.27). Установите ***Tx Antenna*** на ***horn_1GHz***. Выберите ***Rx Antenna*** как ***500MHz_csrc***.

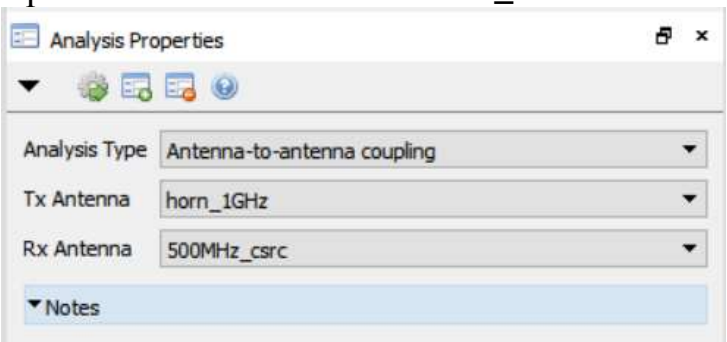


Рис. 7.27. Выбор метода решения задачи в виде нахождения связи между антеннами

Выберите узел ***Analysis: Frequency***.Установите опцию ***Domain Type*** на ***Linear Sweep***. Разверните папку панели ***Frequency Sweep***.Установите ***Start:*** 0.5 GHz, ***Stop:*** 1.0 GHz, ***Number of Steps***: 100

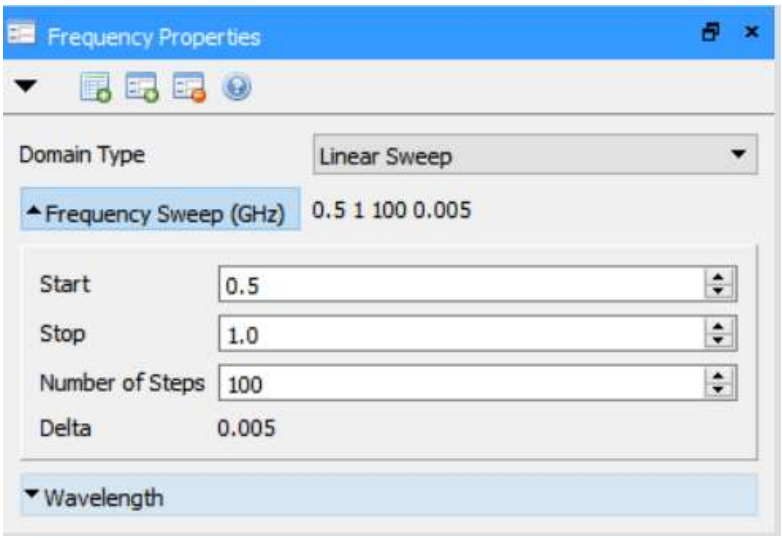


Рис. 7.28. Задание частот анализа

Выберите узел ***Methodology*** (рис. 7.29). Установите ***Ray Density*** (на длину волны) равным 4.0 (по умолчанию). Установите ***Max Number of Bounces*** = 5 (по умолчанию)

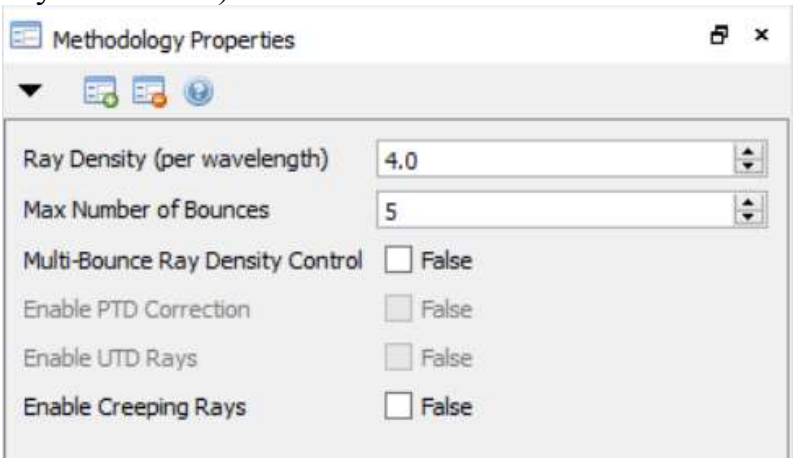


Рис. 7.29. Выбор характеристик: плотности луча
и число пучков из одной точки

Сохраните проект.

7.7 Запуск на расчет и вывод результатов на график

7.7.1 Запуск на расчет и сохранение результатов моделирования.

Выберите ***Run and Save*** из меню ***Run Menu***. Когда расчет завершен, появляется узел ***Rx Signal*** под узлом ***Results***.

Моделирование будет проходить в два основных этапа. На первом этапе текст над панелью выполнения будет показывать ***Normalizing Rx Antenna (Shooting and Bouncing Rays)***.

Процесс расчета не будет идти равномерно. На этом этапе ***Savant*** фактически запускает лучи от антенны $\boldsymbol{R_X}$ (т.е. монопольной антенны ***500MHz_csrc***), как если бы это был передатчик, чтобы определить установленную мощность излучения в сгенерированный глобус дальнего поля. Он использует излученную мощность установленной антенны ***Rx*** для повторного масштабирования (ренормализации) ее уровней, чтобы не смещать уровень мощности сигнала ***Rx*** вверх или вниз.

Обратите внимание, что все антенны в ***Savant*** характеризуются своими свойствами излучения, будь то в виде дальнего поля или источников тока, и эта информация, в сочетании с принципом взаимности, используется для определения их направленной чувствительности в качестве приемников, когда эта роль выбирается в узле ***Analysis***.

На втором этапе текст над прогресс-баром будет ***Shooting and Bouncing Rays***. Этот расчет также не будет продолжаться равномерно, быстро продвигаясь от 0% до 92%, причем последние 8% занимают больше времени. На этом этапе лучи запускаются с назначенной антенны $\boldsymbol{T_X}$ (***horn_1GHz***) для определения как установленной мощности излучения, так и установленной связи с антенной ***Rx***. Установленная мощность излучения антенны передатчика используется для внутреннего повторного масштабирования, чтобы излучать 1 ватт, что позволяет уровень принимаемого сигнала в ваттах численно интерпретировать как безразмерную мощность-коэффициент связи. Общее время выполнения будет в значительной степени зависеть от настройки компьютера. Моделирование с одним ядром и без графического процессора, время моделирования может быть на порядок полчаса. Используя 8 ядер, а не GPU, моделирование завершится через 5 - 10 минут. Если карта GPU активна, моделирование завершится менее чем за одну минуту.

Отчеты о ходе моделирования привязаны к попыткам запуска луча. В целом, отчетность не является однородным по двум причинам. Во-первых, для обработки некоторых лучей требуется больше времени, чем для обработки других лучей. Некоторые попытки запуска луча прекращается очень быстро, потому что их путь от $\boldsymbol{T_X}$ антенны к поверхности CAD-модели заблокирован. Другие лучи долго обрабатываются из-за многократного отражения, особенно при обнаружении проникающих покрытий, что приводит к появлению дополнительных лучевых ветвей. Во-вторых, отмеченный прогресс замедляется для запуска лучей в сторону близлежащих поверхностей, поскольку алгоритм перевыбирает эти поверхности для поддержания точности, заменяя одну попытку запуска несколькими.

Выберите узел ***Rx Signal***. Разверните панель папки ***SBR Ray Statistics***. Статистика распространения лучей приводится в файле с форматом ***.raystat***.

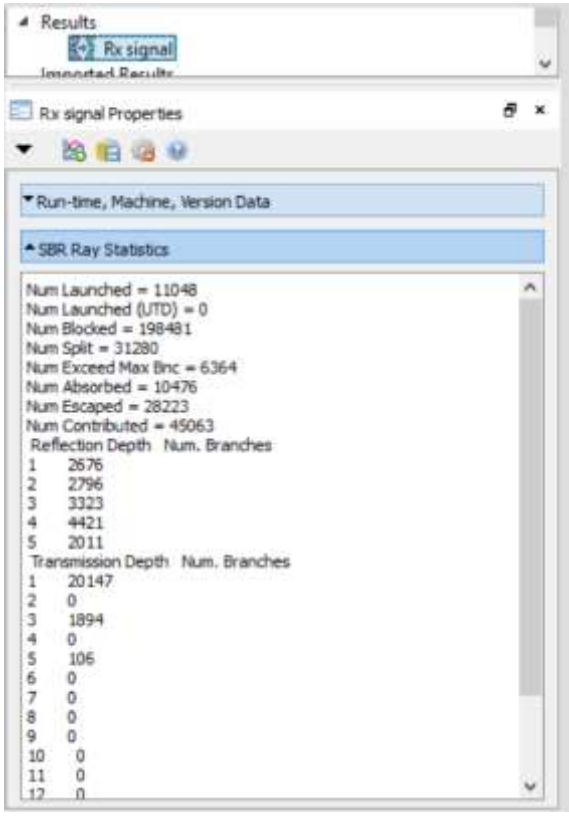


Рис. 7.30. Статистика лучей

Дважды кликните на узел ***Rx Signal***. Открывается окно, в котором показывается частотная характеристика уровня связи между антеннами. Соответствующий узел ***Plot*** создается под узлом ***Windows***.

Разверните узел ***Plot***. Выберите узел ***Plot*: *Total***. Установите ***Scale*** на ***Decibel***. Перетащите узел ***Rx Signal*** в окно ***Plot***.

В графике не произошло никаких изменений, так как она отображается как дубликат трассировки. Новый узел трассы, ***Total 2***, появляется под узлом ***Plot***. Выберите узел ***Plot: Total 2***.

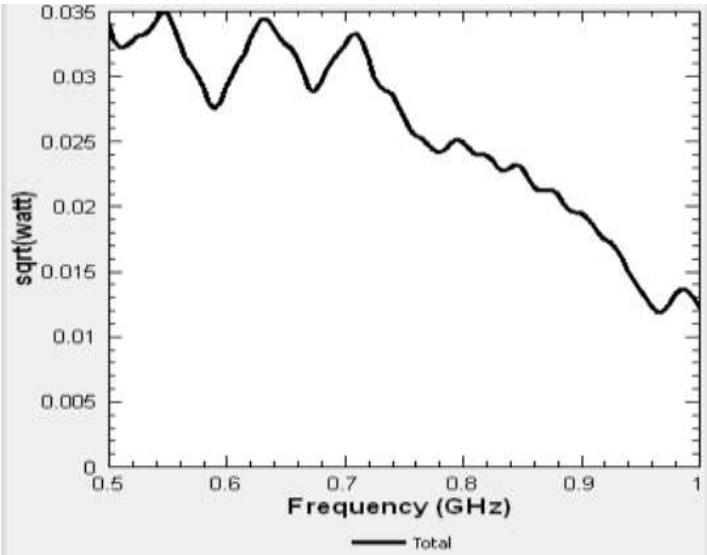


Рис. 7.31. Рассчитанная частотная характеристика связи между антеннами

Установите ***Result Component*** на ***Incident Field***. Теперь падающее поле связи антенн появится в окне в виде красной линии. Кроме того, имя выбранного узла изменяется с ***Total 2*** на ***Inc***. Узлы графиков для результатов связи автоматически именуются в соответствии с ***Result Component***.

Выберите узел ***Plot*** и разверните панель папки ***Y-axis***. Установите ***Y-axis Max*** = -25 и ***Y-axis Range (dB)*** = 15.

Пояснение результатов расчета

Компонента ***Incident Field*** соответствует связи в свободном пространстве между антеннами ***horn_1GHz*** и ***500MHz_csrc***. Это принимаемый сигнал в дБ/Вт, принятый на согласованную нагрузку при излучении антенной ***Tx*** мощности 1 Ватт. Нагрузка $\boldsymbol{R_X}$, как предполагается, будет согласована со входным импедансом антенны приемника в диапазоне частот. Поскольку антенны в ***Savant*** представляются их моделями дальнего поля или распределенными токами, в ***Savant*** нет модели для схемы питания антенны или входного сопротивления. Последствия рассогласования должны быть учтены в пост-процессорной обработке данных в выходном файле проекта: ***Tutorial5.savant/Rx_signal.savant_out/RxSignal.dlxcd***.

Компонента ***Total Field*** показывает связь между антеннами в присутствии платформы. Вне этого диапазона частот она больше, чем в свободном пространстве, из-за, в первую очередь, нахождения антенны ***500MHz_csrc*** на земляной плоскости, на которой она была размещена. Однако, приближаясь к частоте 1 ГГц, этот импульс уменьшается за счет частотной зависимости пространства анализа (***radome***).

8 КОРРЕКЦИЯ РАСХОЖДЕНИЯ ЛУЧЕЙ

Важность коррекции расхождения лучей для искривленных поверхностей будет показана с помощью моделирования параболического отражателя и перекрывающей пластины (рис. 8.1). Это моделирование выполняется дважды, сначала с помощью модели ***IGES*** (криволинейная поверхность) параболической антенны, а затем с помощи ***фасетной*** (граненой) CAD-модели параболы, но с коррекцией искривления, которая реализована в ***Savant***. Результаты сравниваются и объясняются с помощью визуальной трассировки лучей. Затем будет показано, как результаты улучшаются для граненой CAD-модели путем повторного включения опции **коррекции кривизны**.

В разделе также рассматривается коррекция расходимости лучевых трубок для искривленных поверхностей.

Шаги этого примера:

1. Построение и расчет для каждого типа CAD модели.
2. Сравнение результатов.
3. Перезапуск расчета для повторного выделения степени искривления.

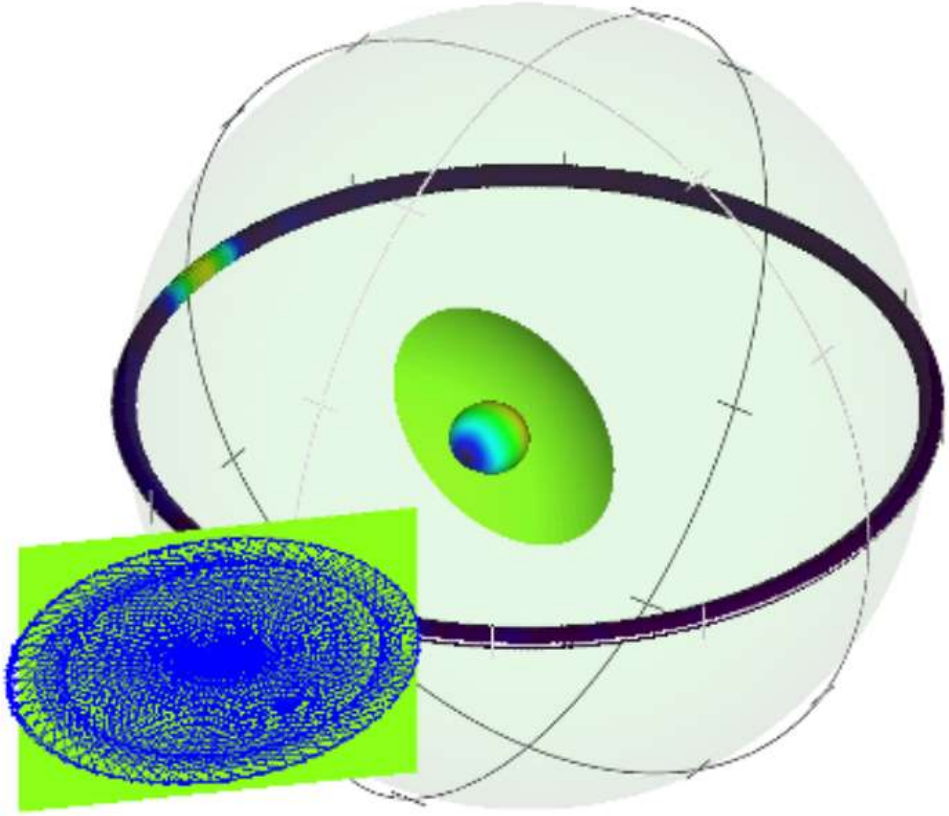


Рис. 8.1. Параболическая антенна и ее ДН

Создадим новый проект ***Savant***, загрузим модель CAD плоскости и зеркала из ***Tutorial6/prb_plate.igs***. Также загрузим модель облучателя параболической антенны командой ***Add Antenna from File*** из файла ***Tutorial6/parabeam.patdat*** (появляется ДН, рис. 8.1).

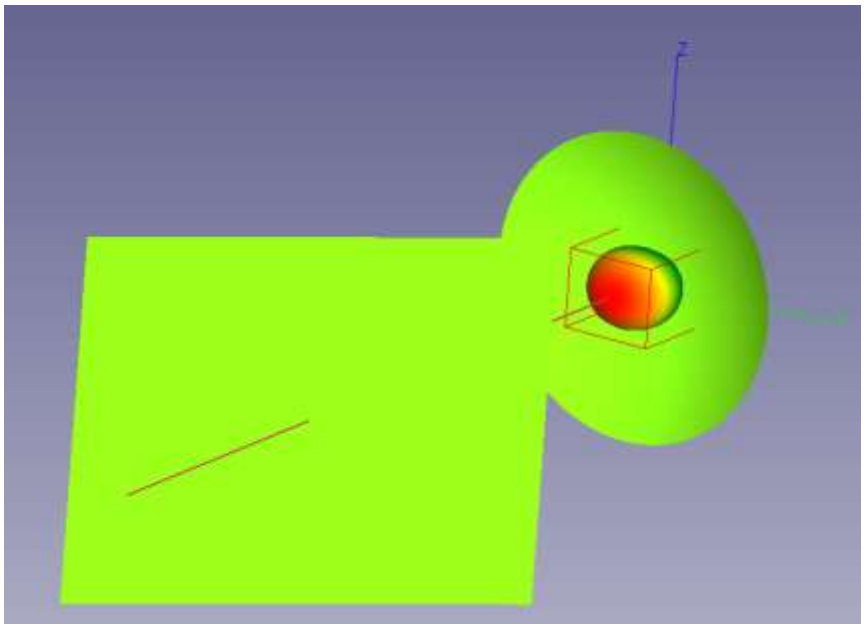


Рис. 8.2. Излучающая параболическая антенна, и плоскость перед ней

Установите положение облучателя ***Position*** в фокус параболы (0.2, 0, 0) м, а также ориентацию антенны ***Orientation*** **= (0,0,180)º**.

Выберите узел ***Analysis.*** Измените тип анализа ***Analysis Type*** на ***Far-field pattern***. Установите ***Tx Antenna*** как ***parabeam***. Затем выберите узел ***Far-Field*** и установите ***Far-field Type*** на ***Azimuth cut***. Установите ***Azimuth Range (degrees):*** **(-180,180,360)**. Выделите узел ***Frequency*** и установите ***Frequency*** = 4.0 GHz и запустите моделирование. Сохраните проект как ***Tutorial6_iges.savant.***

8.1 Запуск проекта для фасетной модели CAD

Удалите узел ***prb_plate***. Чтобы удалить результаты моделирования, нажмите ***OK***. Загрузите модель CAD ***prb_plate.facet***.

Появляется диалог, позволяющий масштабировать к метрам размеры в других единицах модели CAD. Единицы этой модели метры, так что кликните ***Cancel***.

Выберите узел ***Advanced Features***. Включите опцию ***Curvature Extraction***. Узел ***Curvature Extraction*** появится под ***Advanced Features*** автоматически выбранная в дереве проекта.

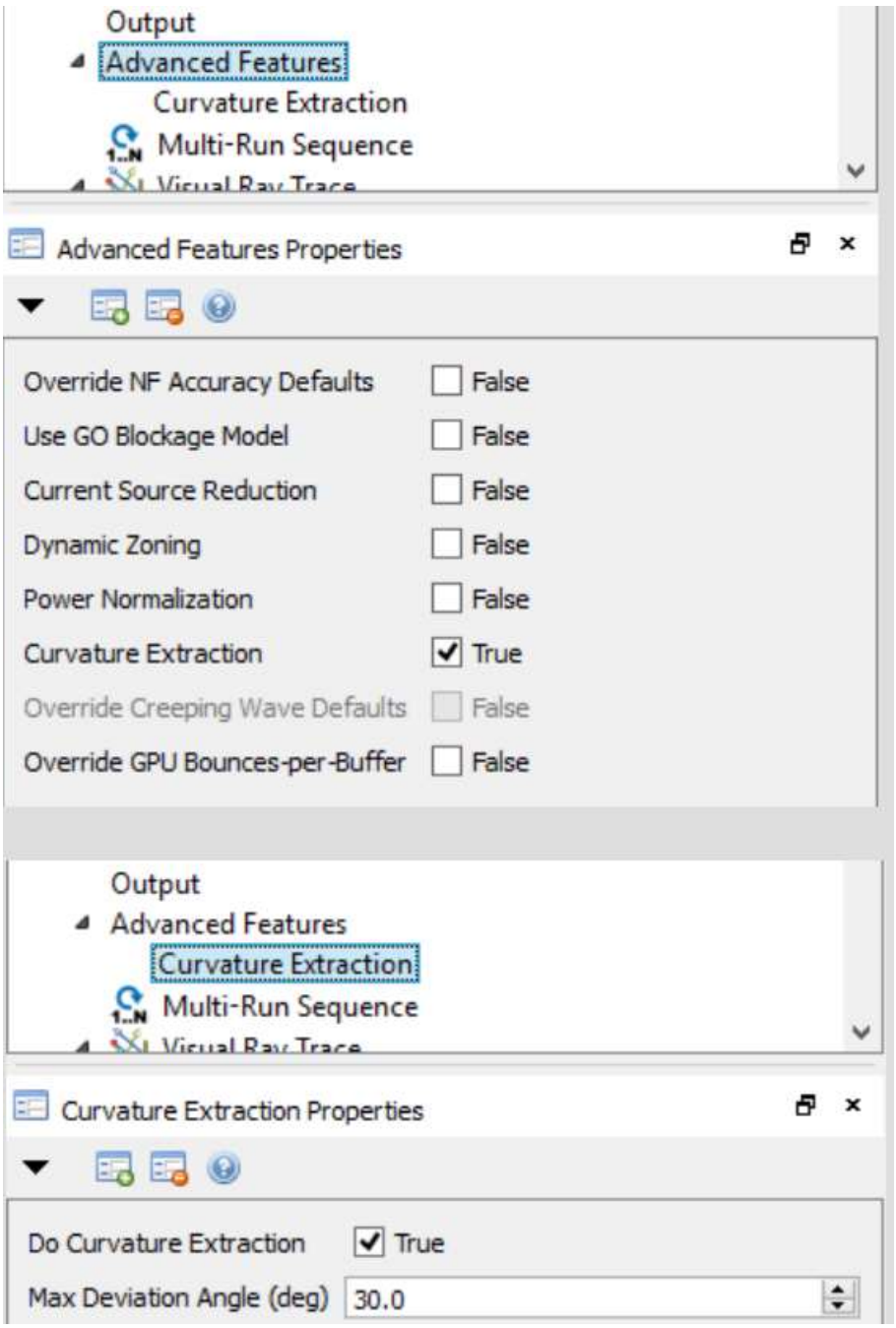


Рис. 8.3. Включение опции выделения искривленной поверхности

В панели свойств ***Curvature Extraction***, отключите ***Do Curvature Extraction.*** Запустите моделирование, а потом сохраните проект как ***Tutorial6_facet***.

8.2 Сравнение результатов

Кликните правой кнопкой мыши узел ***Imported Results*** и выберите ***Import Results from File...*** Перейдите в директорию ***Tutorial6_iges.savant\Far-field.savant_out***, выберите файл дальнего поля ***FF.dlxcd*** и нажмите ***Open***.

8.2.1 Нанесение импортированных данных на график существующих результатов.

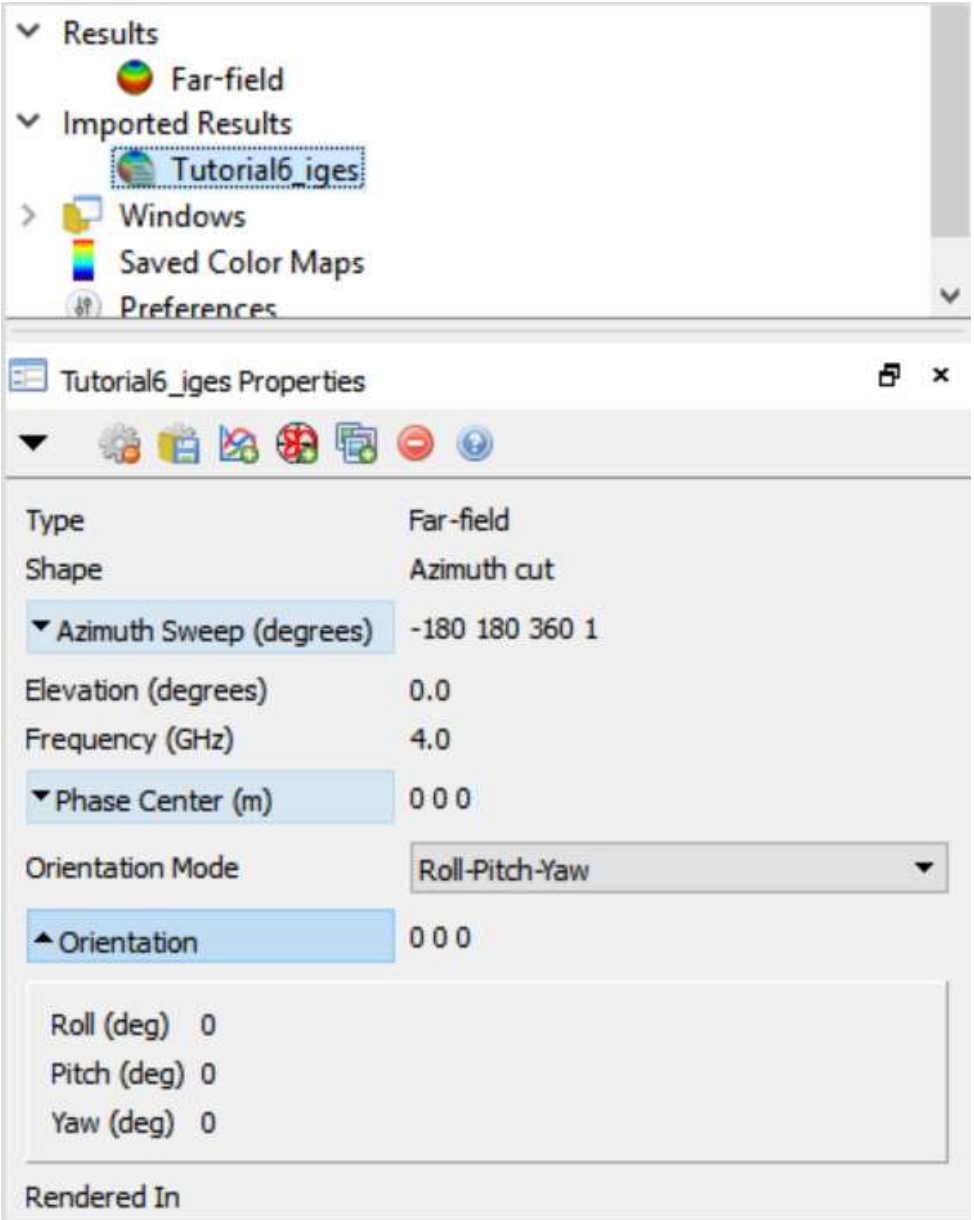


Рис. 8.5. Установка опций импортируемых данных

Дважды нажмите на узел ***Results: Far-Field*** для создания прямоугольной системы координат, *Plot.* Включите ***Custom Legend*** и установите в поле ***Name*** имя «***Facet».***

Установите ***Line Width*** (в папке панели ***Rendering***) = 2.

Кликните и затащите узел ***Results: Tutorial6_iges*** в окно графиков. Включите ***Custom Legend*** и установите в поле *Name* имя «***IGES»***. Установите ***Line Width*** = 2, а также ***Scale = Decibel***

Выберите узел ***Plot*** и разверните папку панели ***Y-axis***. Установите ***Y-axis Range (dB)*** = 70 (рис.8.6).

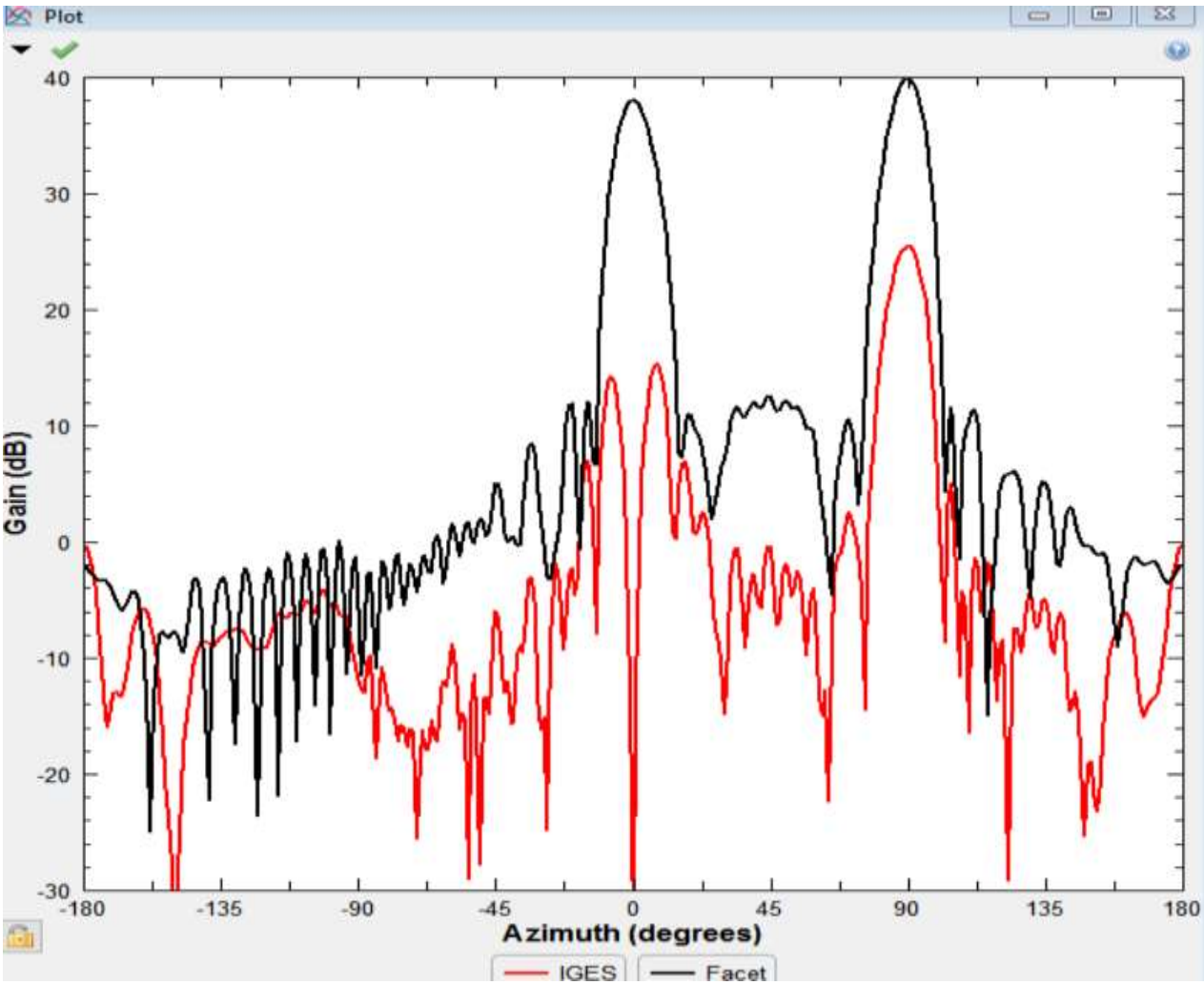


Рис. 8.6. Два, нанесенных на один график, сечения ДН, рассчитанные для разных моделей: для фасетной и для искривленной моделей

Заметим большую разницу в максимумах боковых лепестков при 0 и 90º. Эта разница обусловлена коррекцией или отсутствием коррекции для лучевых трубок на граненых моделях.

8.2.2 Сравнение результатов с и без коррекции сходимости

Этот результат был создан для того, чтобы показать возможность внутренней коррекции расхождения ***Savant***. Обратите внимание, что это невозможно сделать с помощью графического интерфейса ***Savant***, который является преднамеренным.

Импорт файла результатов *Tutorial6/iges_nodf.dlxcd*

Этот результат был создан для конкретной цели этого примера с возможностью внутренней коррекции расхождения в ***Savant***. Отметим, что это невозможно сделать с помощью ***Savant GUI***, как и планируется.

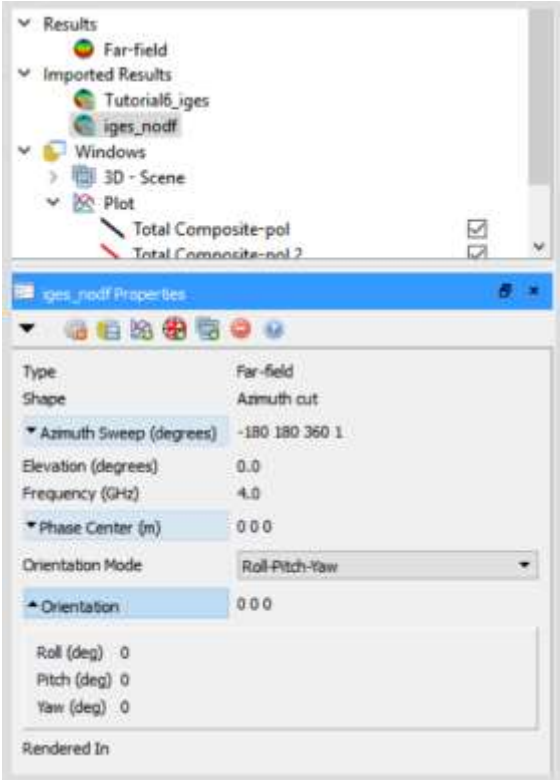


Рис. 8.7. Импорт результата расчета ДН

Дважды кликните на узел ***Results: Far-field*** снова для создания нового декартового графика ***Plot (2)***. Установите: Название линии характеристики ***Custom Legend Name «Facet»***, ***Scale*:** **Decibel**, ширину линии ***Line Width***= 2.

Добавьте результаты ***iges_nodf*** в окно ***Plot (2)***. Установите ***Custom Legend Name*: *IGES (no DF)*** и ***Line Width*** = 2. Выберите узел ***Plot (2)*** и установите ***Y-axis Range (dB)*** = 70.

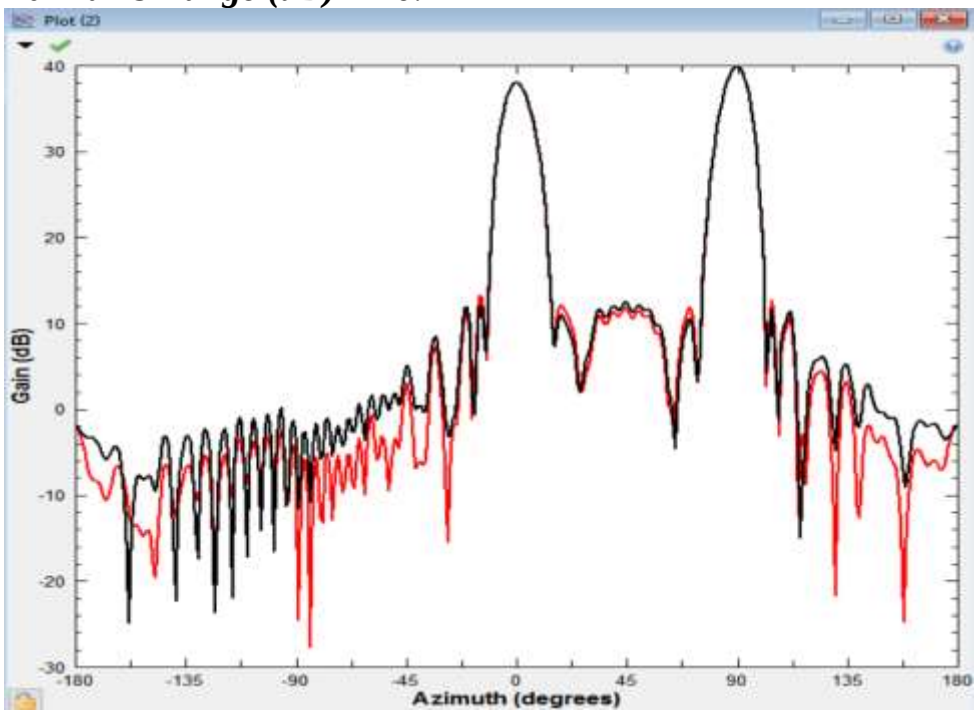


Рис. 8.8. Две характеристики на одном графике

Без коррекции дивергенции пиковые значений боковых лепестков точно совпадают между двумя случаями. Но почему коррекция расходимости оказывает столь сильное влияние на структуру дальнего поля? Чтобы ответить на этот вопрос, мы будем использовать визуальное трассирование лучей.

8.2.3 Представление визуальной трассы луча

Выберите узел ***Visual Ray Trace***. Установите ***Max Frequency*** = 4.0 GHz. Сконфигурируйте запуск лучей ***Launch* from *Transmitter***.

Запустите расчет лучей, нажимая кнопку ***Shoot Rays*** в панели свойств узла ***Visual Ray Trace***. Разверните узел ***Visual Ray Trace*: *SBR***. Выберите узел ***SBR*: *Filters***. Выберите опцию ***By Bounce # and*** и затем установите:

Minimum Bounces: 2

Maximum Bounces: 2

Выберите узел ***SBR: Rendering***. Снимите опцию ***Draw as Lines*** и опцию ***Draw as Ray Footprints***. Ориентируйте окно ***3D window*** чтобы получить хороший вид лучей на блокировочной плоскости.

Это поможет заблокировать видимость узла ***Windows*: *3D - Scene*: *Far-Field***.

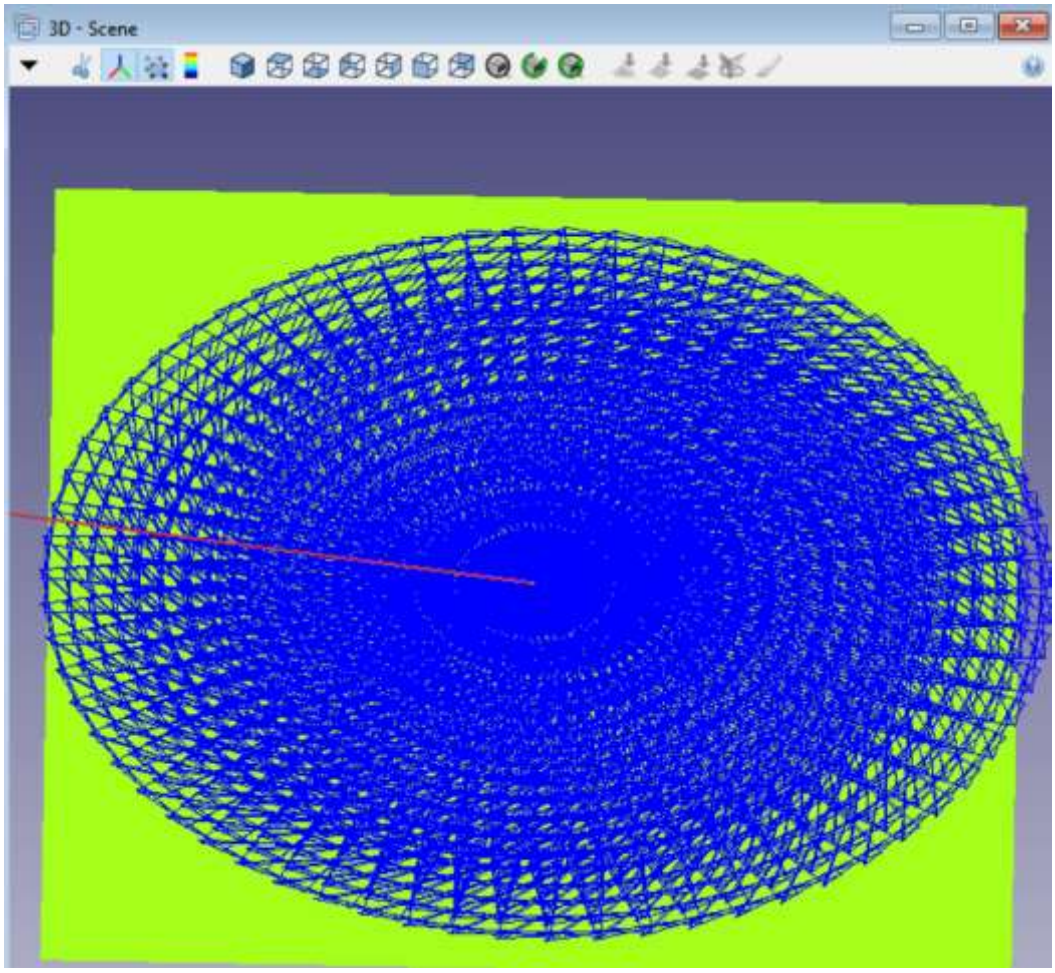


Рис. 8.9. Лучи в районе параболического зеркала

8.2.4 Создание точки захвата ДН лучей на обоих CAD моделях.

Нажмите кнопку ***Save Snapshot*** в окне ***3D***. Сохраните ***snapshot*** на ваш интерфейс как ***facet_footprints.png***. Сохраните проект

Загрузите проект ***Tutorial6_iges***.

Повторите расчет лучей для получения подобного изображения на **footprints** в модели ***IGES***. Вы можете увеличить ширину линии ***Footprint Line Width*** до 3 чтобы сделать её более видимой.

Сравните два изображения (рис. 8.10). Обратите внимание на то, как следы на модели фасета перекрывают друг друга, в то время как на модели ***IGES*** нет перекрытия. Когда луч, запущенный с антенны, отражается от вогнутой поверхности (в данном случае параболического отражателя), скорость распространения уменьшается. Поскольку источник расположен в фокальной точке параболического отражателя, лучи коллимируются и скорость распространения падает до нуля в этом конкретном (но распространенном) случае. Для этого учитывается коррекция расходимости, и в результате хорошо выровнены следы на блокирующей плате.

Без коррекции сходимости, трассы становятся слишком большими и перекрывают друг друга. Каждая перекрывающаяся трасса создает эффект диафрагмы, приводящий к сильно усиленному рассеянию в прямом и отраженном направлениях (относительно блокирующей пластины) и уменьшенному рассеянию в других направлениях. Композитными эффектами являются повышение уровней пиков, отмеченных выше.

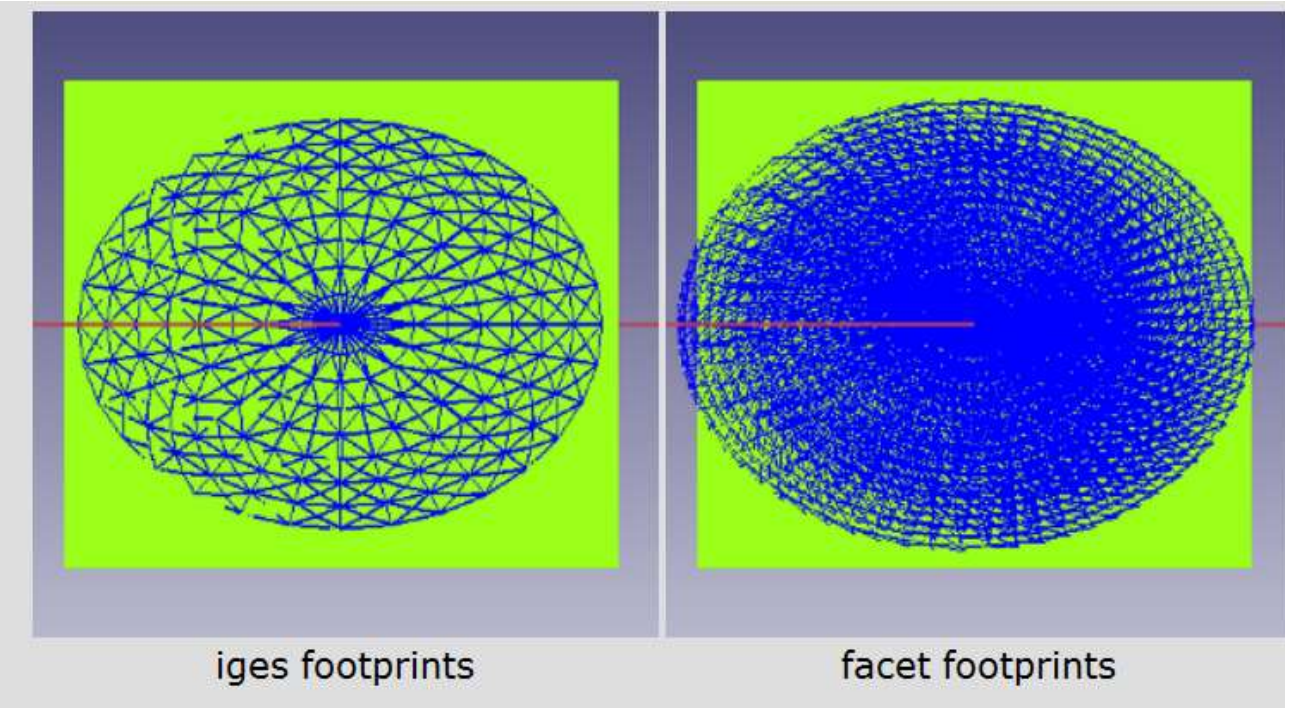


Рис. 8.10. Разбиение на треугольники поверхности зеркальной антенны
iges footprints ***facet footprints***

8.3 Перезапуск результатов с выделением искривления поверхности

Хотя граненые модели не имеют информации о кривизне, необходимой для вычисления коррекции расходимости, ***Savant*** включает возможность извлечения кривизны ***curvature extraction***, которая приближает кривизну поверхности, подразумеваемую пространственными отношениями между соседними связанными гранями. Извлечение кривизны изначально было отключено по умолчанию и должно было быть включено вручную. Однако, начиная с ***Savant 18.0***, выделение кривизны включено по умолчанию для фасетной модели; если не нужно, эта опция должна быть явно отключена, как мы делали на шаге 1.2. Сейчас, мы включим его обратно.

Загрузите проект ***Tutorial6_facet*** и сохраните его как ***Tutorial6_facet_wDF***.

Выберите узел ***Analysis*: *Advanced Features***. Отключите опцию ***Curvature Extraction*** в панели узла ***Advanced Features***. Если можно удалить результаты, нажмите ***OK***. Узел ***Far-field*** исчезает, но два узла импортируемых результатов остаются.

Выключение дополнительной функции ***Curvature Extraction*** снимает результат использования алгоритма извлечения кривизны. Поскольку извлечение кривизны является характеристикой по умолчанию ***Savant*** для граненых моделей, целью расширенного анализа является либо отключение, либо установки этой характеристики по умолчанию.

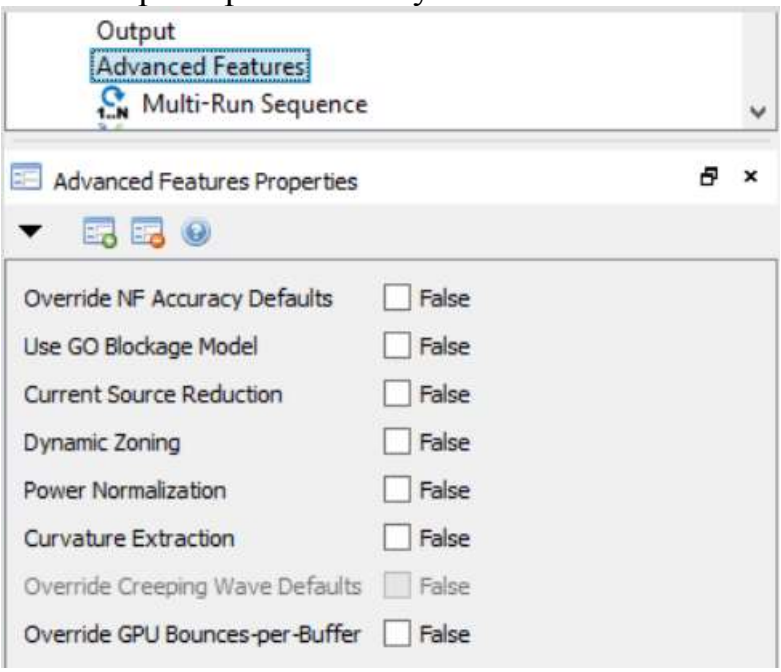


Рис. 8.11. Выбор дополнительных опций

Запуск на расчет и сохранение результатов моделирования

Создайте новый график показывающий все три результата. Заметим, что результаты улучшаются, когда применяется коррекция сходимости.

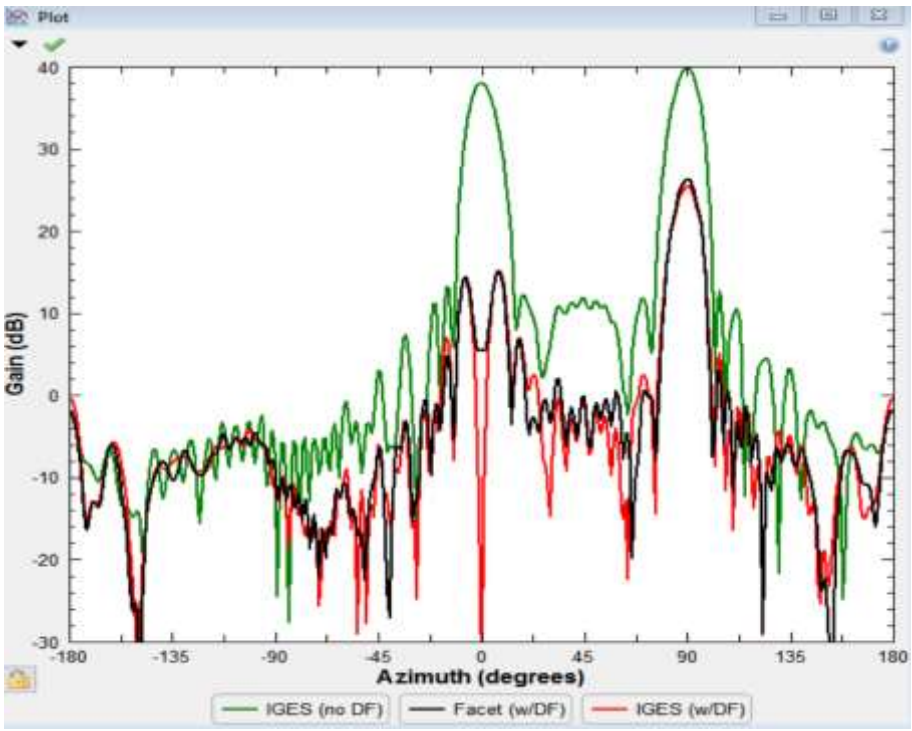


Рис. 8.12. Сечения ДН для различных описаний искривленной модели

IGES – гладкая модель без компенсации
Faset – фасетная модель с компенсацией
Красная – гладкая модель с компенсацией.

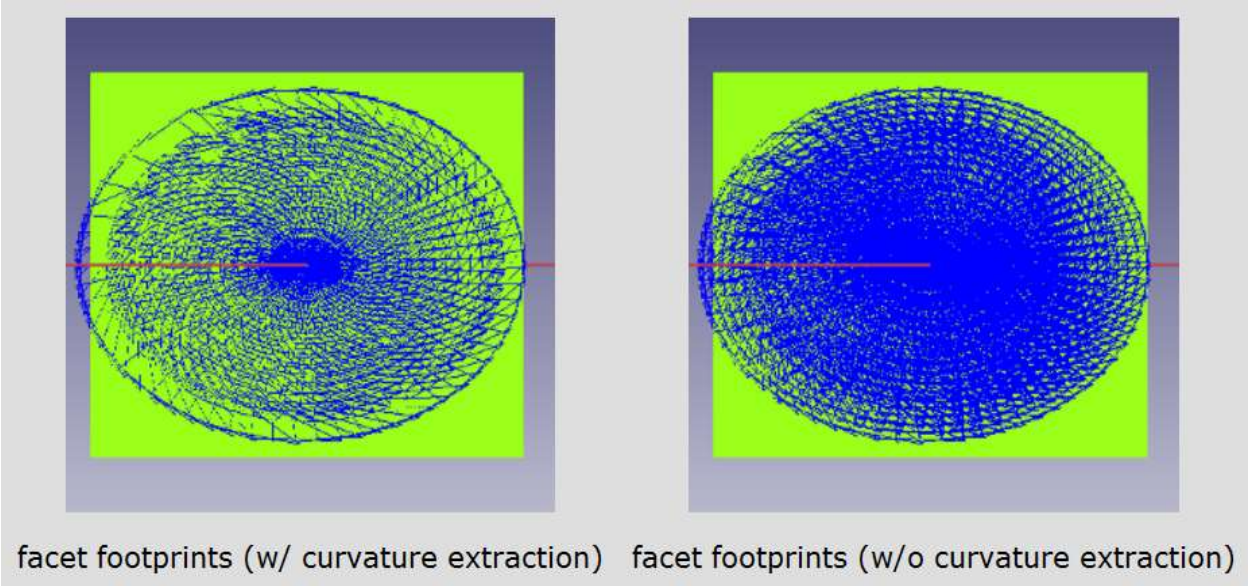


Рис. 8.13. Разбиение на сетку искривленных поверхностей

Повторите шаги, описанные выше, чтобы создать снимок контуров на блокировочной плоскости. Сравните изображения и обратите внимание, как перекрытие зависимостей значительно уменьшилось. В то время как графики не идеально согласуются, как это делают для модели ***IGES***, области отпечатков теперь являются правильными, и это является самым важным фактором при определении рассеянного поля блокирующей пластины.

9 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН СОСКАЛЬЗЫВАЕНИЯ

Выполним моделирование лучей, используя волны соскальзывания (в литературе встречается термин «ползущие волны» в ***Savant***. Функция поверхностных волн используется, выполняя моделирование с участием проводной монопольной антенны, установленной на поверхности цилиндра со сферическими крышками (рис. 9.1). Выполняется моделирование трассировки лучей с использованием ***IGES*** и фасетных моделей. Результаты моделирования сравниваются с результатами, полученными только из ***SBR***.

Шаги этого упражнения (Пример 7):

1. Установления сценария волн соскальзывания
2. Визуализация волн соскальзывания
3. Моделирование с учетом волн соскальзывания
4. Сравнение с результатами полученными методом ***SBR***

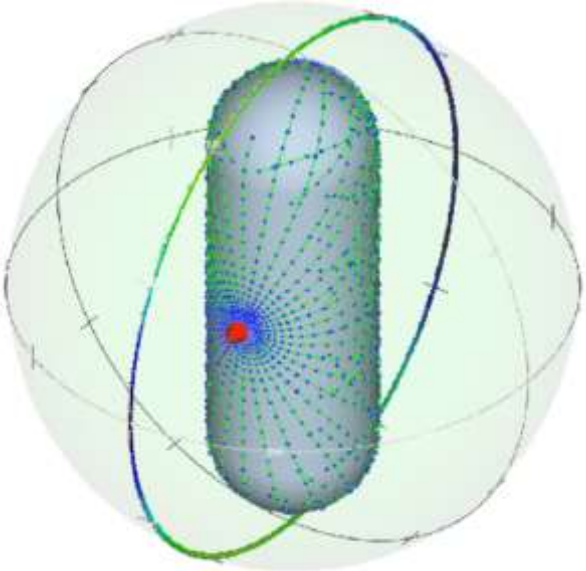


Рис. 9.1. Вид модели для изучения волн соскальзывания

9.1 Установки проекта с волнами соскалзывания

Загрузите модель CAD ***Tutorial7/cyl_sphereCaps.igs***. Затем загрузите антенну в виде источника тока из файла ***Tutorial7/sed1.csrc***. Выберите узел ***Scene*: *sed1***.

Установите положение антенны ***Position*** как (0.1575, 0, 0). Установка высоты диполя над поверхностью на расстоянии $\lambda/40$ на частоте 1,0 ГГц. Это нужно для того, чтобы иметь диполь на поверхности для того, чтобы моделировать монопольную антенну, но требуется небольшое смещение, чтобы предотвратить неоднозначность относительно того, находится ли

источник выше или ниже поверхности. Установка ориентации антенны (рис. 9.2) выполняется в разделе ***Orientation***: ***Roll*** = 0, ***Pitch*** = -90, ***Yaw*** = 0.

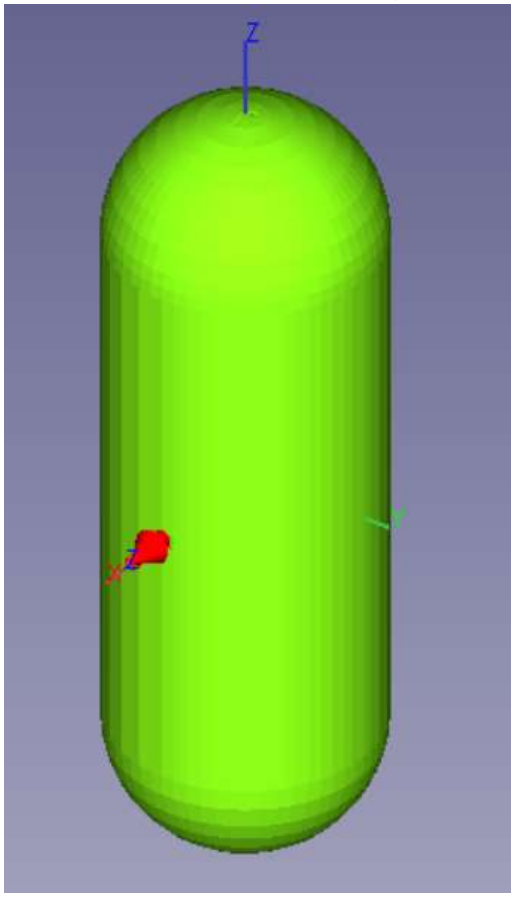


Рис. 9.2. Ориентация модели на цилиндрической платформе

9.1.1 Включение в анализ волн соскальзывания

Анализ волн соскальзывания ограничен для конкретного типа анализа. Следующие условия должны выполнены:

Модель CAD вводится в виде файла с искривленными поверхностями ***curved-surface *.igs*** или модель фасок с высоким разрешением, чтобы обеспечить высокую точность учета искривленной поверхности данных, используя свойство ***Savant curvature extraction***.

Антенна должна быть создана на источниках тока, либо импортирована из файла ***.csrc***, или импортированная как ***Near Field Antenna***, или создана из одной из встроенных параметрических антенн так, что она представляется как источник тока.

Передатчик должен быть расположен близко к поверхности CAD (на расстоянии долей от длины волны). Поверхность CAD модели вблизи к передающей антенны должна быть искривлена.

Для расчета выберите узел ***Analysis*** измените ***Analysis Type*** на ***Far-Field Pattern***. Установите ***sed1*** на ***Tx Antenna***.

Выберите узел ***Analysis***: ***Methodology***. Выберите опцию ***Enable Creeping Rays***. Это активизирует механизм поверхностных (ползущих) волн

соскальзывания и позволяет создать узел с именем ***Creeping Wave*** который появляется под узлом ***Methodology***.

Выберите узел ***Methodology: Creeping Wave*** и выберите его установки. Имеется четыре главных параметра включающих моделирование волн соскальзывания (рис. 9.3): ***Number of Rays*** - число лучей волн для заполнения пространства вокруг трансмиттера. По умолчанию равно 180.

Tx Distance Ratio - положительное целое число которое определяет уровень токов наложения представленные в области возле передающей антенны. Рекомендуемая установка равна 5-20. По умолчанию равно 5.

Sample Density - число выборок источника тока на длину волны генерируемая как лучи, ползущие по поверхности. По умолчанию эта величина равна 10.

Ray Cutoff - эта величина в dB устанавливает срез, который определяет ползущие лучи, которые должны быть остановлены. Когда сила источника падает ниже его пиковой величины среза, луч завершает свое распространение. По умолчанию эта величина равна 80 dB.

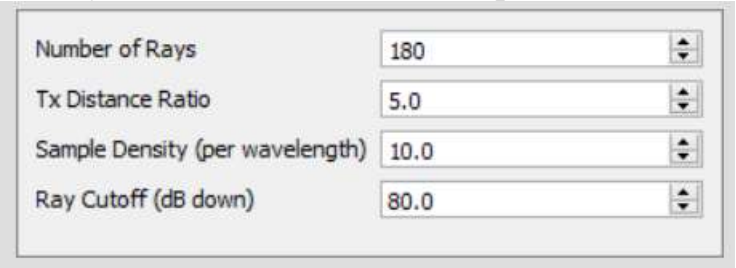


Рис. 9.3. Выбор характеристики распространения лучей

Сохраните проект как ***Tutorial7.savant***.

9.2 Визуализация волн соскальзывания

9.2.1 Трассирование лучей для анализа волн

Выберите узел ***Visual Ray Trace.*** Заметим, что имеется опция в панели свойств ***Shoot Creeping Rays***. Одна в этой точке эта опция не активна. Чтобы включить эту опцию, несколько критериев должно быть выполнено:

Должна быть загружена антенна с источником тока. Эта антенна должна быть установлена как передающая в узле ***Analysis***. Опция ***Launch from*** в узле ***Visual Ray Trace*** должна быть установлена как ***Transmitter***. Опция ***Launch from Tx*** должна быть установлена на ***Phase Center.***

Мы будем теперь конфигурировать запуск на расчет, чтобы выполнить эти условия.

Отключите узел видимости ***Windows*: *3D - Scene*: *Far-Field***.
Выберите узел ***Analysis***. Из выплывающего меню ***Tx Antenna***, выберите антенну как источник тока (***sed1***).

Выберите узел ***Visual Ray Trace***.

Из меню ***Launch from*** выберите **Transmitter**.

Из меню ***Launch from Tx***, выберите **Phase Center**.

Окно опции ***Shoot Creeping Rays*** можно редактировать

Отключите опцию ***Shoot SBR Rays***. Появляется дочерний узел ***Visual Ray Trace*: *SBR***.

Включите запуск лучей ***Shoot Creeping Rays.***

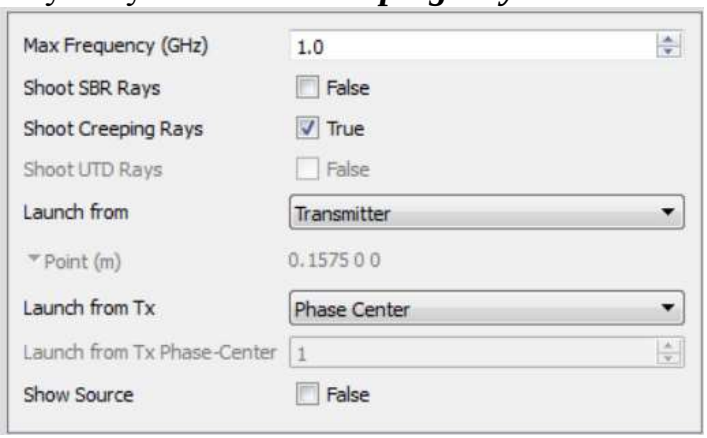


Рис. 9.4. Выбор установок на расчет

Появляется дочерний узел ***Visual Ray Trace*: *Creeping Wave***, который содержит те же самые установки, которые обсуждались на шаге 1. Измените опцию ***Ray Cutoff (dB down)*** = 40 dB

9.2.2 Выполнения запуска лучей

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Visual Ray Trace*** и выберите действие ***Shoot Rays***. После нескольких секунд, волны соскальзывания появляются в окне сцены. Два дочерних узла, ***Rendering*** и ***Filters***, появляются под узлом ***Creeping Wave***.

Выберите узел ***Rendering***. Разверните папку панели ***Draw as Lines***, затем разверните папку ***Line Color***. Подстройте слайдеры, так чтобы лучи стали голубыми (рис. 9.5).

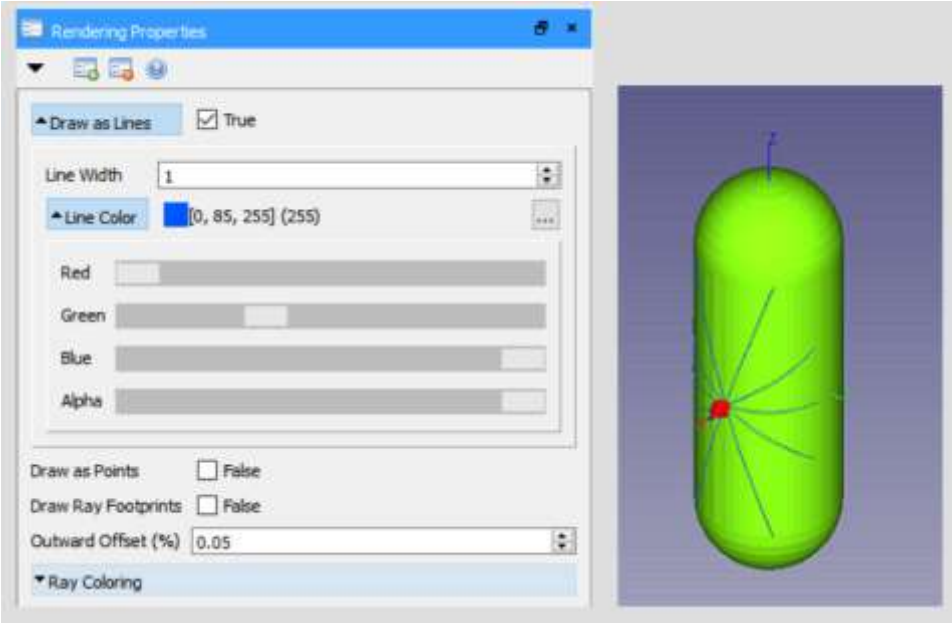


Рис. 9.5. Выбор толщины линии и цвета лучей

Выберите дочерние узлы и попробуйте различные опции. Огибающие (псевдо-волны) - неспектральные.

9.2.3 Исследование эффектов огибающих ползучих волн

Выберите узел ***Visual Ray Trace*: *Creeping Wave*** и увеличьте ***Number of Rays*** = 50. Кликните кнопку *Shoot Rays*. Лучи становятся ближе друг к другу.

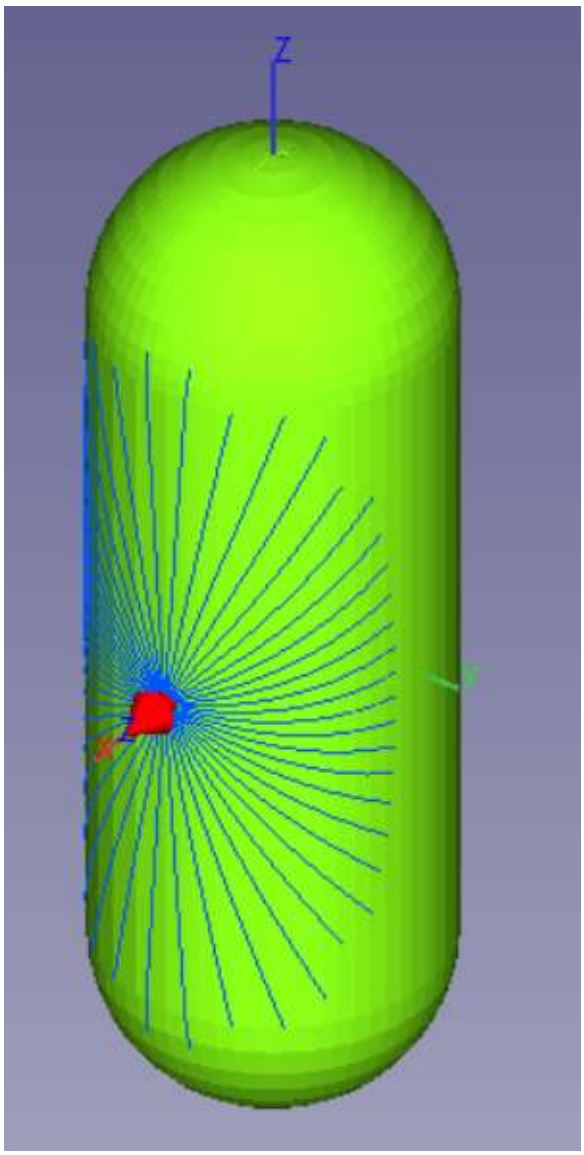


Рис. 9.6. Волны соскальзывания, прижимающиеся к поверхности модели

В узле ***Rendering*** переключитесь на ***Draw Ray Footprints***. Это позволяет увидеть лучи, прижимающиеся к поверхности модели в виде огибающей поверхностной волны. Заметим, что при увеличении ***Number of Rays*** в узле ***Creeping Wave***, сходимость поверхностных волн улучшается (рис. 9.5).

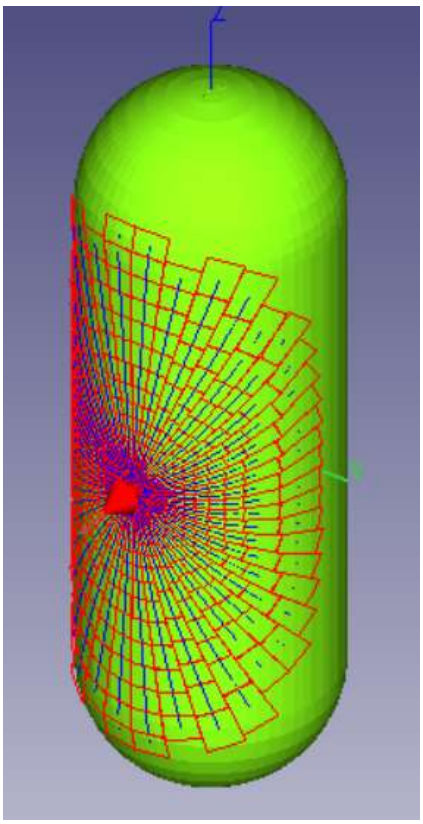


Рис. 9.7. Поверхностные волны

Увеличьте ***Ray Cutoff*** до значения 70 и кликните ***Shoot Rays***. Лучи расширяются до большего расстояния.

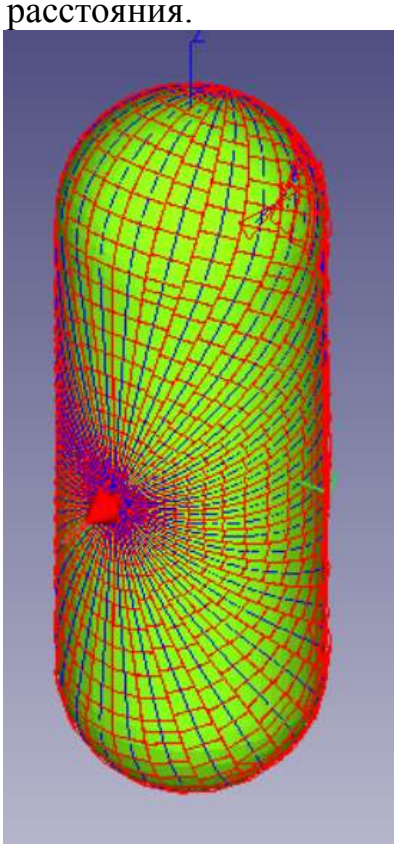


Рис. 9.8. Волны соскальзывания при значении ***Ray Cutoff*** =70

В узле ***Rendering***, отключите ***Draw As Lines*** и ***Draw As Footprints*** и включите ***Draw As Points***. В узле ***Creeping Wave***, измените ***Sample Density*** = 30 и измените ***Tx Distance Ratio*** до значения 10.

Кликните ***Shoot Rays***. Обратите внимание, как изменяется расстояние между точками. Помните, что ***Tx Over Sample Factor*** влияет только на точки рядом с передатчиком, поэтому он может помочь отключить стрелку источника тока, чтобы увидеть этот эффект более четко.

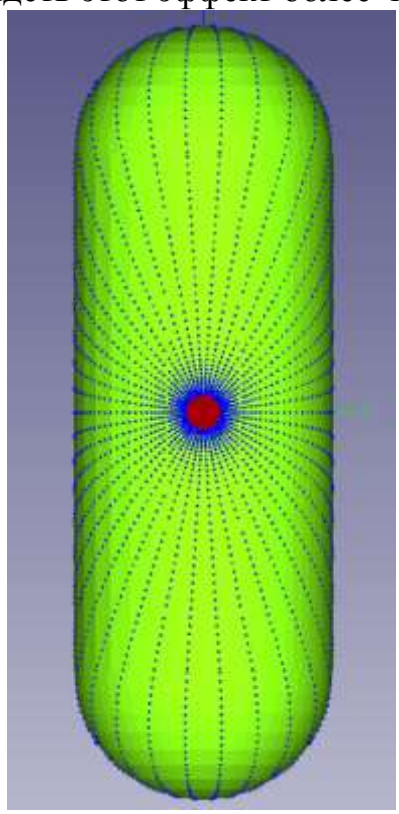


Рис. 9.9. Пятьдесят поверхностных волн вдоль поверхности металлической модели

9.3 Представление и моделирование с учетом волн соскальзывания

Выберите узел ***Analysis***. Измените ***Analysis Type*** как ***Far-field Pattern***. Выберите узел ***Far-Field***. Измените ***Far-field Type*** на ***Elevation Cut***.

Сконфигурируйте ***Elevation Range***: ***Start*** = -180, ***Stop*** = 180, ***Number of Steps*** = 360. Включите узел видимости ***Windows***: ***3D - Scene***: ***Far-Field***.

Выберите узел ***Analysis:Frequency*** и установите ***Frequency*** **= 1 GHz.**

Выберите узел антенны ***sed1*** и запустите расчет. Результаты можно видеть на рис. 7.10.

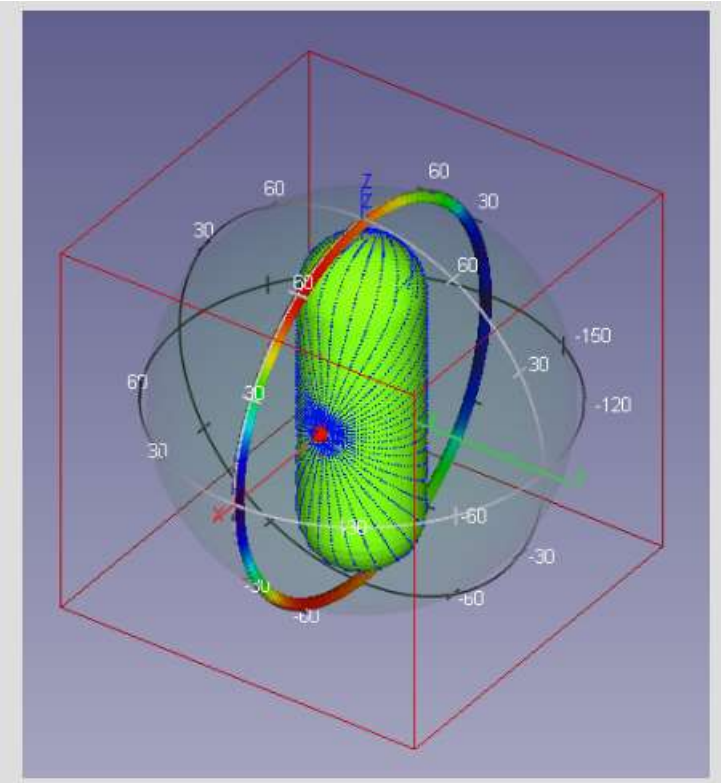


Рис.9.10. Волны соскальзывания и ДН излучения

9.4 Сравнение результатов полученных методом SBR

Кликните правой кнопкой мыши на ***Imported Results*** и выберите ***Import Results from File...***. Выберите ***SBR_ff.dlxcd*** из папки ***Tutorial 7***.

Создадим график в полярной системе координат (рис. 9.11). Видим, что волны соскальзывания изменяют ДН излучения, особенно в области затенения.

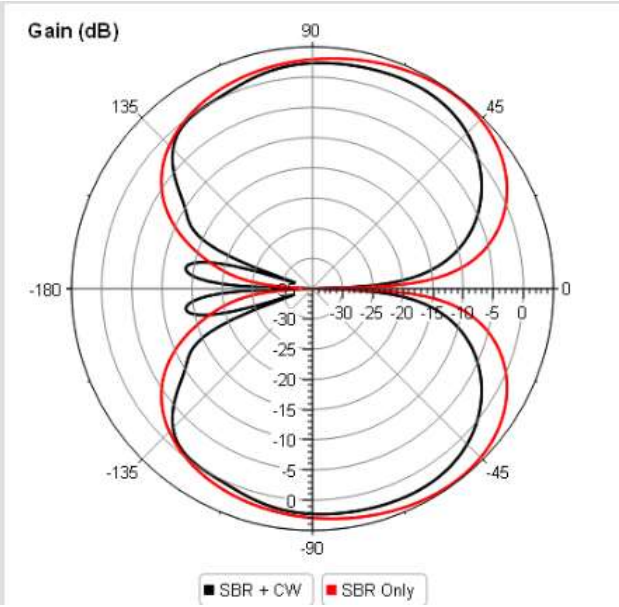


Рис. 7.11. ДН в полярной системе координат с учетом и без учета волн соскальзывания

10 АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

В программе ***Savant*** можно моделировать антенные решетки. Сконфигурируем и рассчитаем антенную решетку λ x λ, расположенную на $\lambda/4$ выше земляной плоскости размером 10λ x 10λ (рис. 10.1). Покажем, как можно управлять уровнем боковых лепестков и направлением излучением ФАР.

Шаги этого примера:

1. Добавление прямоугольной антенной решетки в сцену.
2. Конфигурирование элемента антенной решетки.
3. Расположения элементов решетки для создания разностной ДН.
4. Размещение антенной решетки над земляной плоскостью.
5. Конфигурирование области углов дальнего поля и установки на расчет.
6. Запуск на моделирование и вывод результатов расчета.

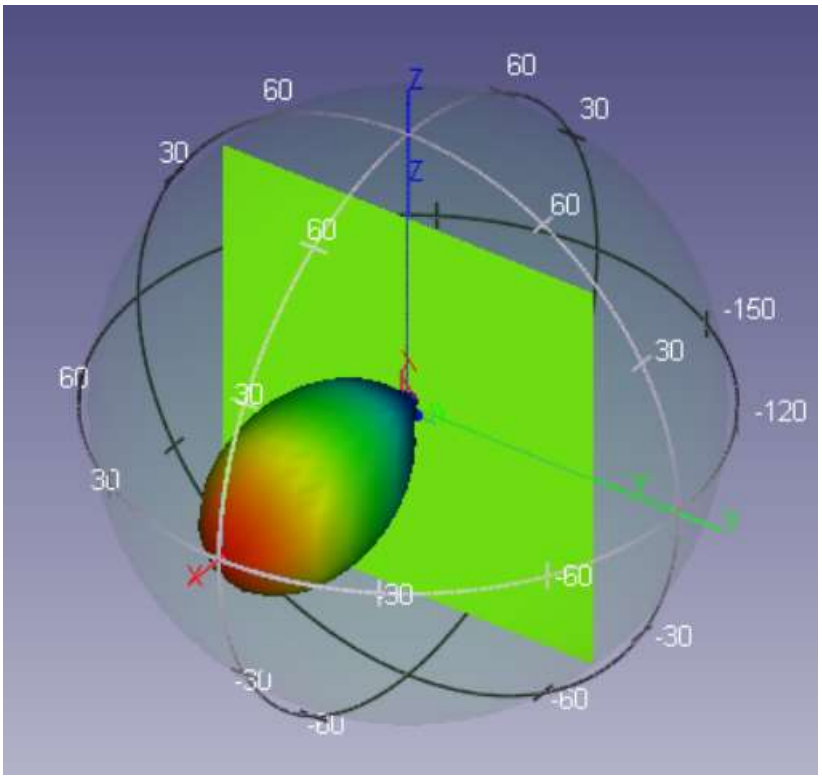


Рис. 10.1. ДН антенной решетки

Этот пример выполняется с файлами в директории ***Tutorial8***.

10.1 Добавление прямоугольной антенной решетки к сцене

Существует два способа добавления и настройки антенной решетки. Один из них состоит в импорте созданного пользователем файла ***.sarr***. Другой заключается в использовании команды ***Add Antenna Array*** программы ***Savant*** для создания антенной решетки (рис. 10.2). Мы используем второй метод в

этом примере. Можно было бы также добиться того же эффекта с файловым вводом, но с большими усилиями, чтобы определить положения, ориентацию и возбуждение элементов. Преимуществом ввода в виде файла является большая гибкость, например возможность создания искривленных ФАР.

В дереве проекта, кликните правой кнопкой узел ***Scene.***

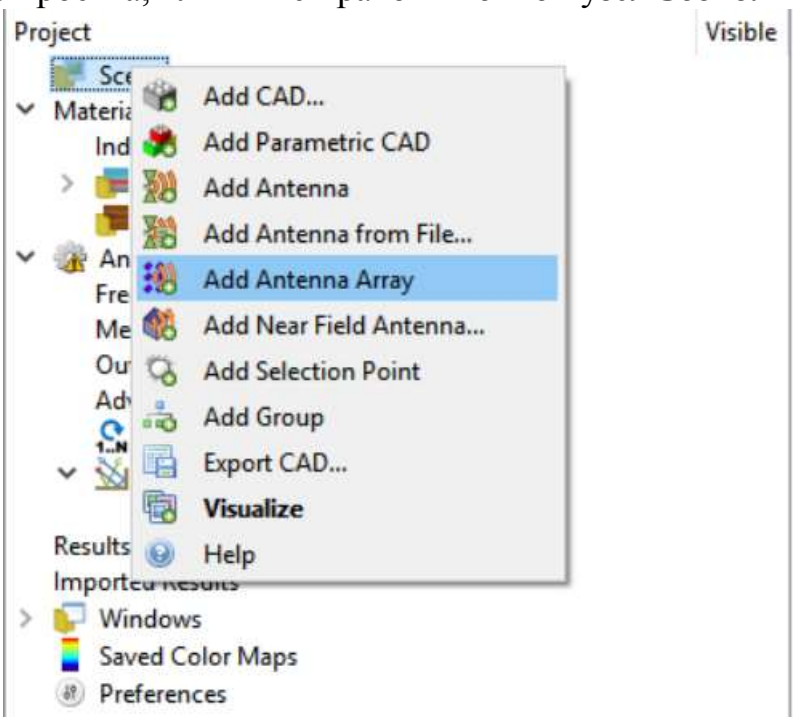


Рис. 10.2. Выбор антенной решетки в сцену проекта

Выберите ***Add Antenna Array***. Новый узел ***Antenna Array 1*** добавляется к дереву (рис. 10.3).

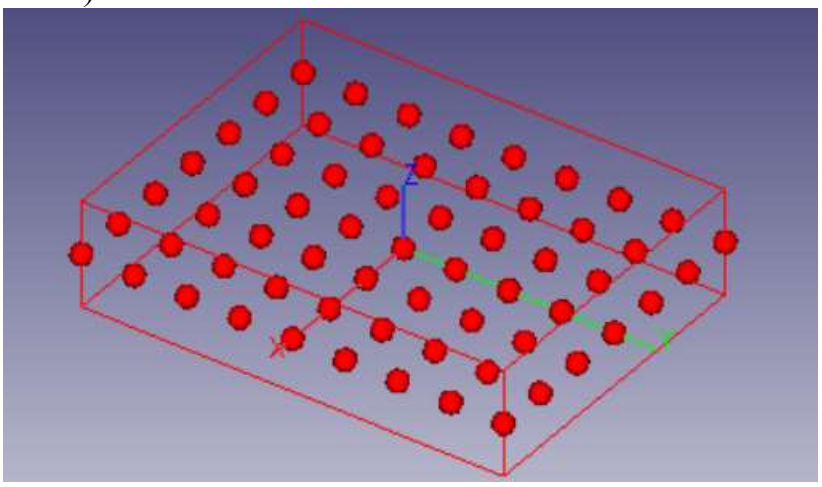


Рис. 10.3. Антенная решетка

Выберите вновь созданный узел в дереве проекта. В панели свойств, разверните папку ***Array Dimensions and Spacing***. Выберите тип решетки ***Type*** как ***Rectangular***. Включите расчет в длинах волн ***Design in Wavelengths*** **(*True*).**

Установите ***Length (Wavelengths)*** и ***Width (Wavelengths)*** равными 1.0, расстояние между элементами ФАР по длине ***Length Spacing (Wavelengths)*** =

0.5, а расстояние между элементами ФАР по ширине ***Width Spacing (Wavelengths)* = 0.25.**

Это сконфигурирует решетку, показанную на рис. 10.4.

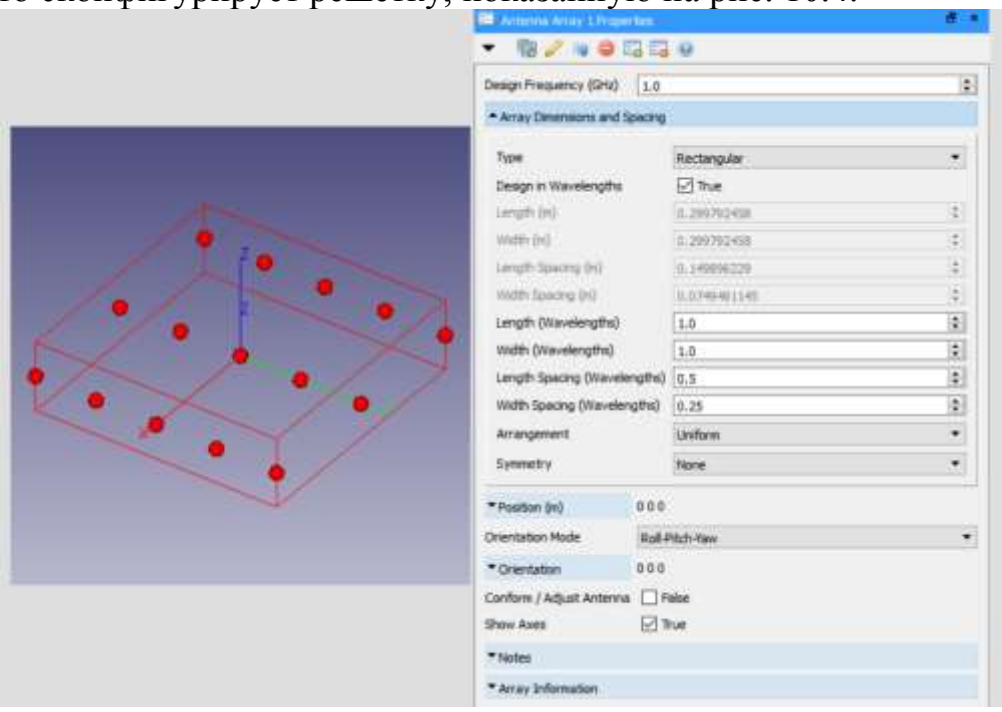


Рис. 10.4. Антенная решетка размером 1*λ x 1*λ

Кликните кнопку ***Save Project*** и сохраните проект как ***Tutorial8.savant***.

10.1.1 Элемент антенной решетки в виде электрического диполя

В дереве проекта кликните на узел ***Antenna Array 1*: *Element***.

В панели свойств узла ***Element***, установите ***Type*** как ***Short Dipole***. Расположение решетки и элемента будут изменены с выбором нового элемента. Любую антенну, которая может быть задана в ***Savant***, можно использовать для создания антенной решетки.

Разверните узел ***Element***. Выберите узел ***Element*: *Element Pattern***. В панели свойств, подстройте слайдер ***Size***= 0.75 (рис. 10.5).

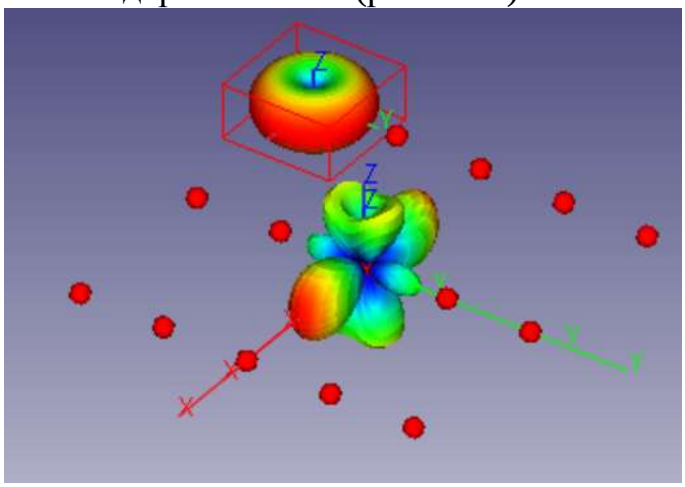


Рис. 10.5. ДН одного элемента и всей антенной решетки

Выберите узел ***Element***. На панели свойств, установите ***Type*** как ***By File***.

Найдите директорию ***Tutorial8*** и откройте ***eledpl.csrc***. Это загружает один электрический диполь, определенный в текущем исходном файле. Он становится повторяющимся антенным элементом решетки. Новый элемент (единственный источник тока) отображается как стрелка в 3D-сцене на место первого элемента решетки.

Трехмерная ДН антенной решетки автоматически рассчитывается и отображается в центре ФАР (рис. 10.6).

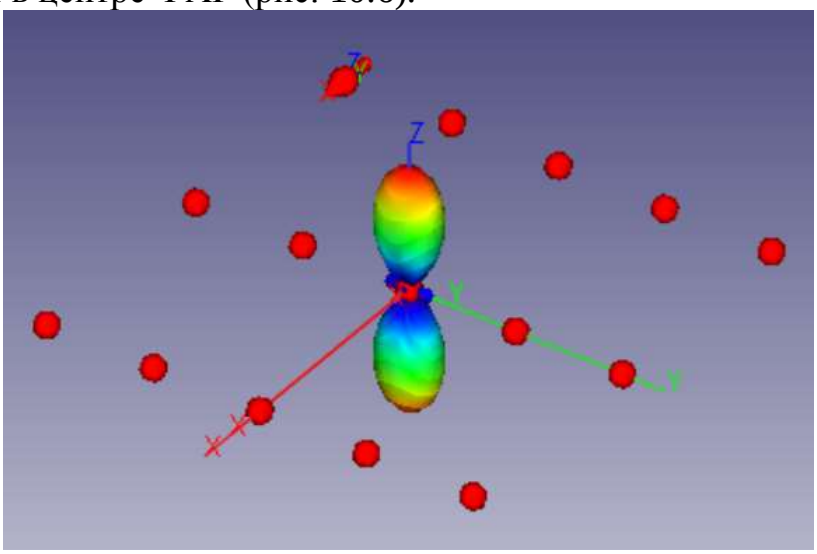
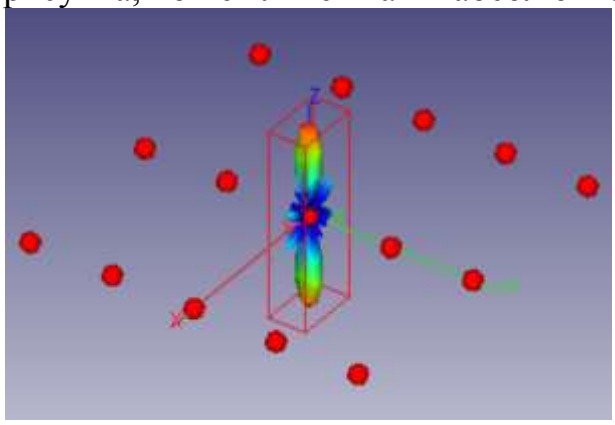


Рис. 10.6. Трехмерная ДН антенной решетки

Снимите опцию ***Deselect*** для ***Current Sources*** в дереве проекта

Это сделает невидимыми стрелки источников тока, чтобы начертить угловые элементы решетки. Выберите узел ***Array Pattern***.

Измените частоту ***Render Frequency*** на значение 2 GHz. ДН антенной решетки может быть представлена на частотах от одной десятой до десяти от частоты проектируемой решетки (рис. 10.7-10.8). Частота рендеринга не зависит от частоты моделирования, определенной в узле ***Frequency***. Изменение рабочей частоты с 1 ГГц на 2 ГГц эквивалентно увеличению электрического расстояния между элементами в 2 раза для отображаемого рисунка, но не влияет на их абсолютное разрежение.



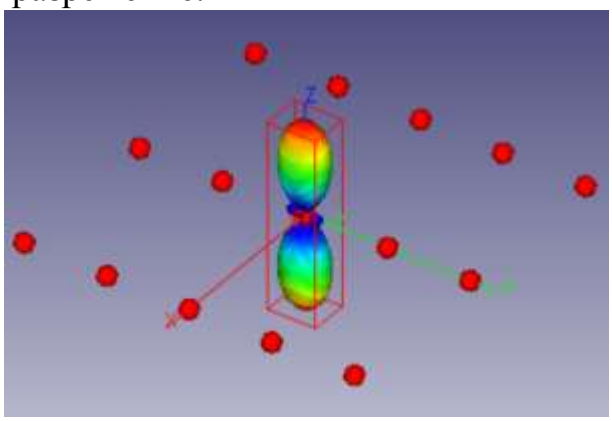


Рис. 10.7. ДН для установленной частоты 2 ГГц

Рис. 10.8. ДН антенной решетки для частоты 1 ГГц

Возвратим рабочую частоту на значение 1 GHz.

10.2 Задание возбуждения элементов антенной решетки

10.2.1 Задание апертуры излучения

В дереве проекта кликните на узел ***Antenna Array 1*: Weights/Array Rendering**. Кликните на селектор ***Aperture Taper*** и выберите косинусное распределение возбуждения ***Cosine***. Это изменит значения амплитуд возбуждения элементов ФАР так, что она приобретает косинусный профиль возбуждения, с максимумом в центре и минимумом по краям. В своей конфигурации по умолчанию функция конуса ***Cosine*** переходит к нулю на кромках апертуры, делая элементы ребер невидимыми, поскольку маркеры элементов имеют размер в соответствии с их амплитудой и показывают ток в соответствии с масштабом.

Если выбран параметр ***Cosine***, нужно выбрать две опции: ***Cosine Power*** и ***Edge Taper Level (dB)***. Первый параметр задает мощность, на которую повышается косинусная функция. Второй параметр задает уровень, на котором элементы на кромке апертуры будут возбуждаться относительно центра апертуры.

Установите ***Cosine Power*** = 2 и ***Edge Taper Level*** = -10 dB.

Введение конусности апертуры (рис. 10.9) снижает уровень боковых лепестков антенной решетки относительно токового распределения по умолчанию ***Flat*** конус, который использовался в конце шага 1. Однако ширина диаграммы направленности решетки для косинусоидального распределения также увеличивается.

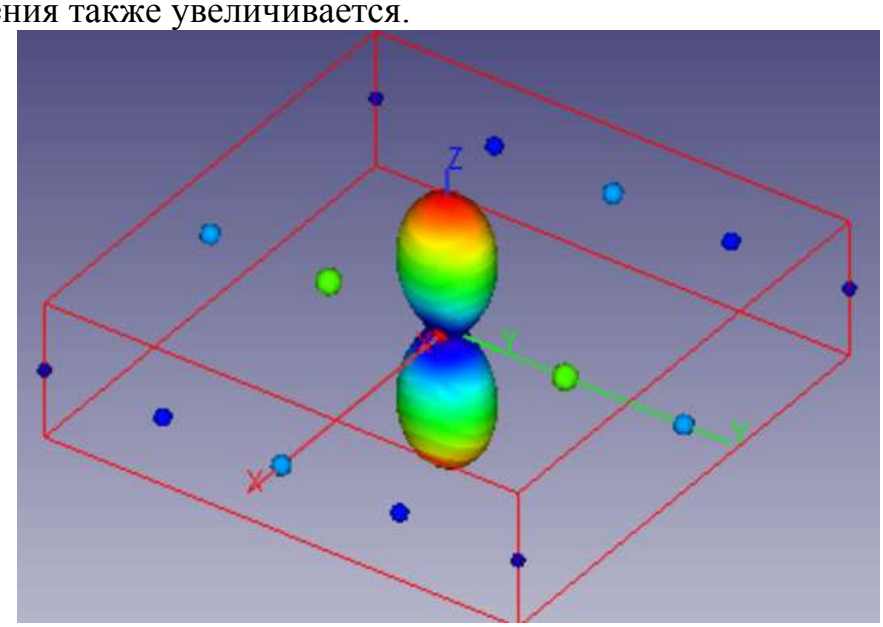


Рис. 10.9. ДН для косинусного возбуждения ФАР

10.2.2 Конфигурация сечения лучевого угла решетки

В панели свойств узла ***Weights/Array Rendering***, установите следующие углы луча:

- ***Main Beam Azimuth***=0°
- ***Main Beam Elevation***=45°

Фазы возбуждения элементов изменятся так, чтобы обеспечить наклон луча на 45° между осями +x- и +z (рис. 10.10).

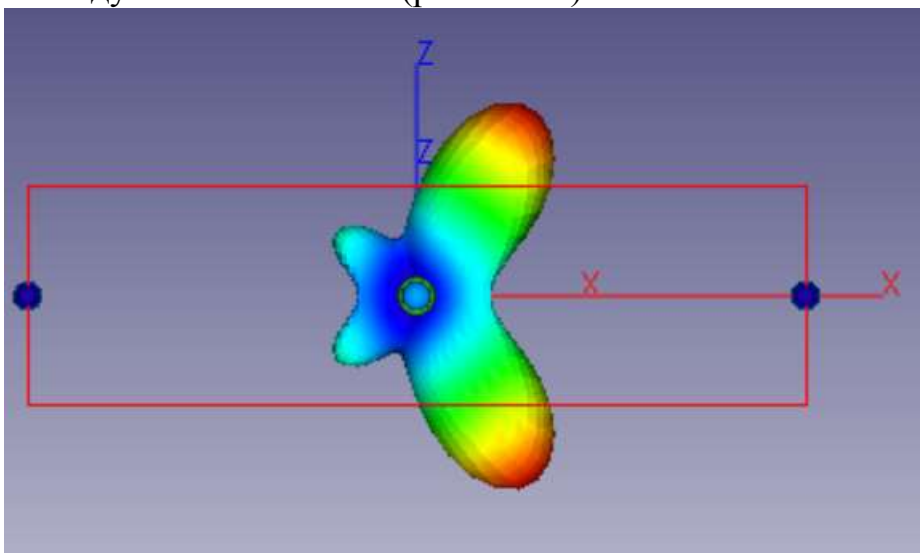


Рис. 10.10. Изменение направления излучения ФАР

Кликните на селектор ***Scale*** и выберите ***Phase***. Цвет и размер маркеров элементов теперь будут соответствовать фазе возбуждения элементов (рис. 10.11).

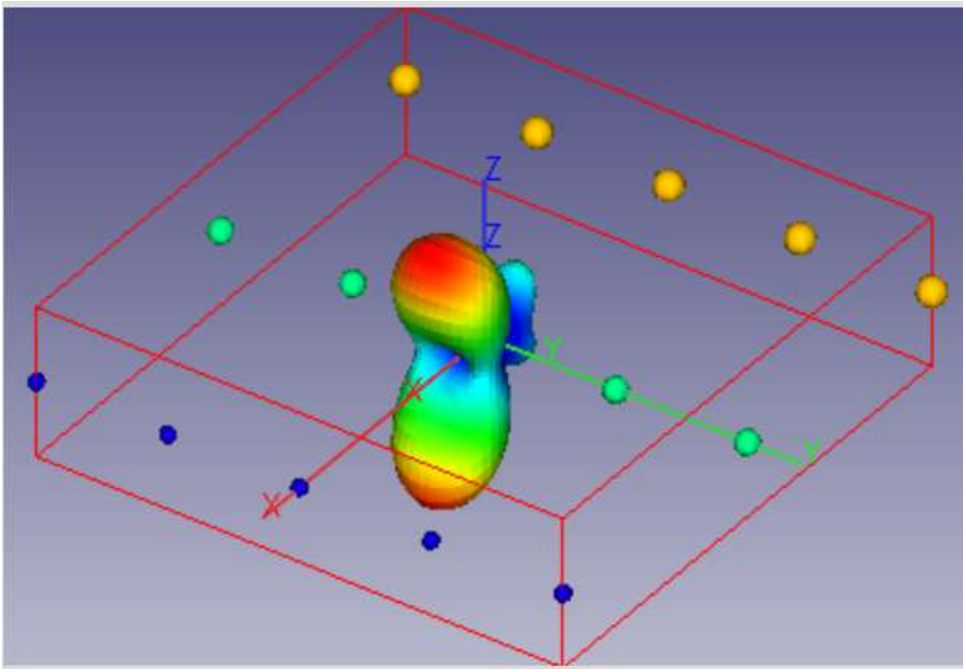


Рис. 10.11. ДН антенной решетки

Возвратитесь к исходным величинам для создания главного луча антенной решетки:

- ***Main Beam Azimuth***=0°
- ***Main Beam Elevation***=90°

Выберите опцию ***Linear*** из выплывающего селектора ***Scale*** для создания исходной цветовой шкалы для веса элементов (рис 10.12).

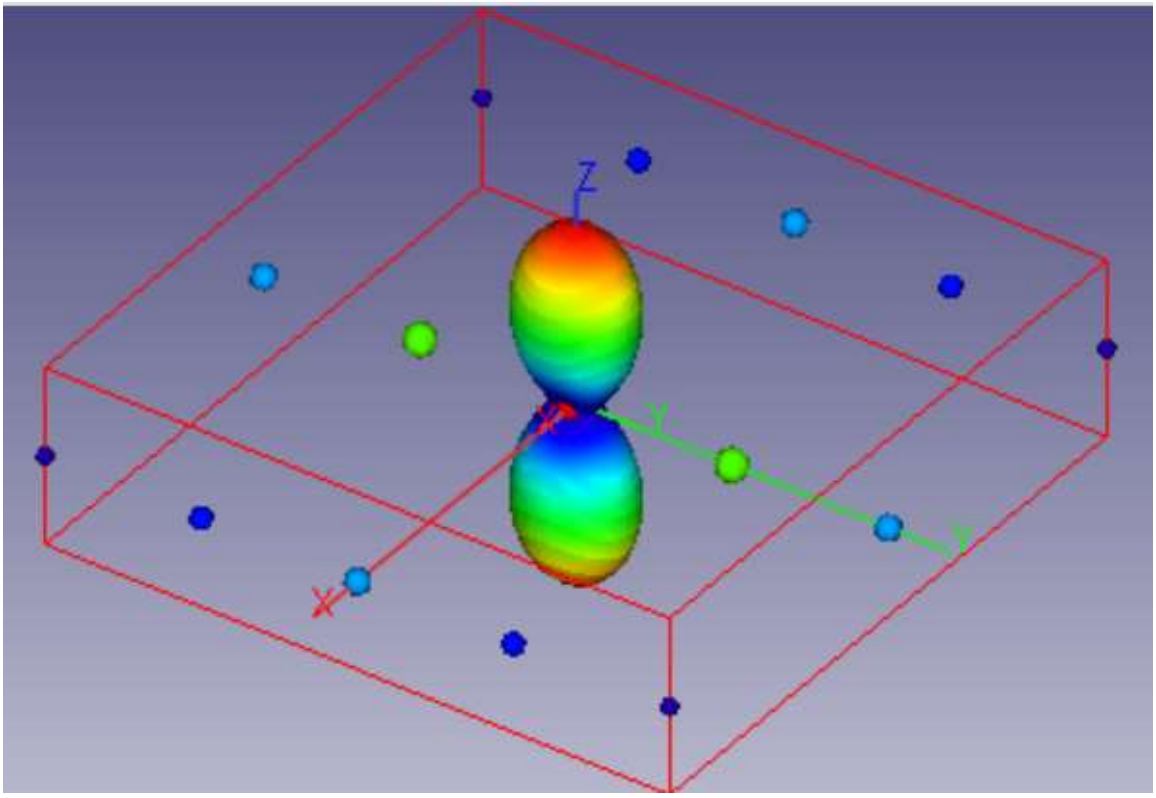


Рис. 10.12. ДН антенной решетки с заданным возбуждением элементов

Кликните *Save Project*.

10.3 Установка расчетной частоты решетки

Кликните узел ***Antenna Array 1***. Разверните папку панели ***Array Dimensions and Spacing***. Отключите ***Design in Wavelengths*** и измените ***Design Frequency*** на значение 2.0 GHz. Изменение ***Design Frequency*** на значение 2 GHz также изменит ***Render Frequency*** на значение 2 GHz.

Поскольку опция ***Design in Wavelength*** была отключена, абсолютные размеры разрешения решетки сохраняются. Изменения ДН решетки при одновременном изменении размера апертуры и расстояния между элементами равно двум длинам волн после этих изменений (рис. 10.13).

Разрешение в длинах волн будут сохраняться постоянными, если выбрана опция ***Design in Wavelength***.

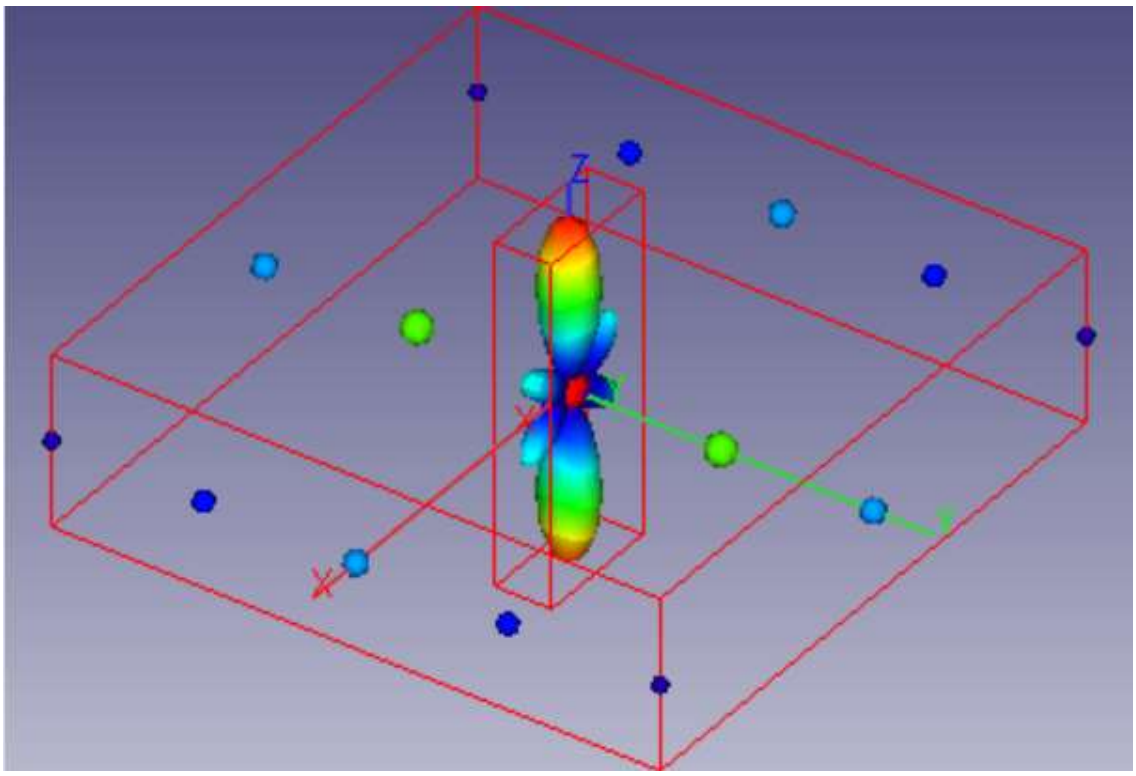


Рис. 10.13. ДН антенной решетки на частоте 2 ГГц

Измените ***Design Frequency*** обратно к значению 1.0 GHz (рис. 10.14).

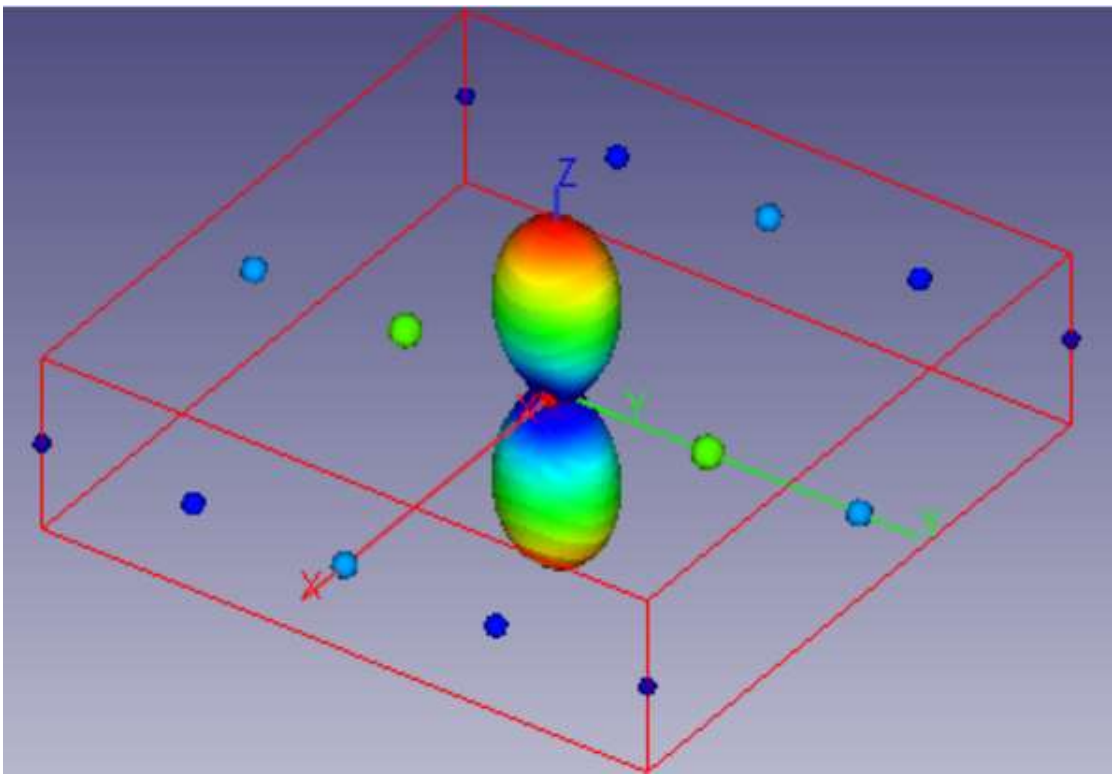


Рис. 10.14. ДН антенной решетки на частоте 1 ГГц

10.4 Реконфигурация расположения элементов антенной решетки для сохранения разностной ДН

10.4.1 . Конфигурирование расположения и симметрии

Кликните узел ***Antenna Array 1***. Разверните папку ***Array Dimensions and Spacing***. Из выплывающего селектора ***Arrangement***, выберите опцию ***Vertical Stagger***. Это не даст немедленного эффекта (рис. 10.15).

Установите ***Stagger Angle*** = 15°. Рассмотрим, как элементы размещены, при внесении такого угла смещения. В общем, вертикальные столбцы смещаются на заданный угол каждого второго элемента столбца решетки.

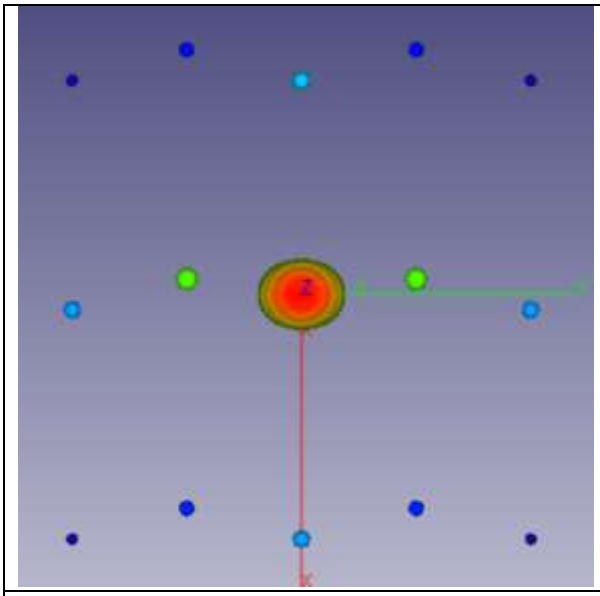


Рис. 10.15 Изменение положений элементов антенной решетки

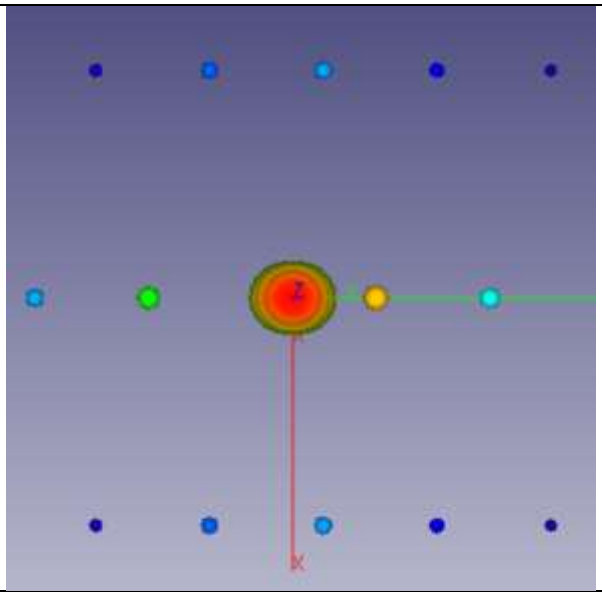


Рис. 10.16. Размещение элементов антенной решетки

Выберите опцию ***Horizontal Stagger*** из селектора ***Arrangement***. Теперь каждый второй элемент антенной решетки исчезает (рис. 10.16).

Изменим установку ***Symmetry*** на ***Horizontal***. Это обеспечивает четное число элементов в каждой строке решетки (параллельной оси Y), рис. 10.17. Однако элементы не отображаются симметрично относительно оси X в этом случае, так как симметрия применяется априори к возбуждаемым элементам в ***Savant***.

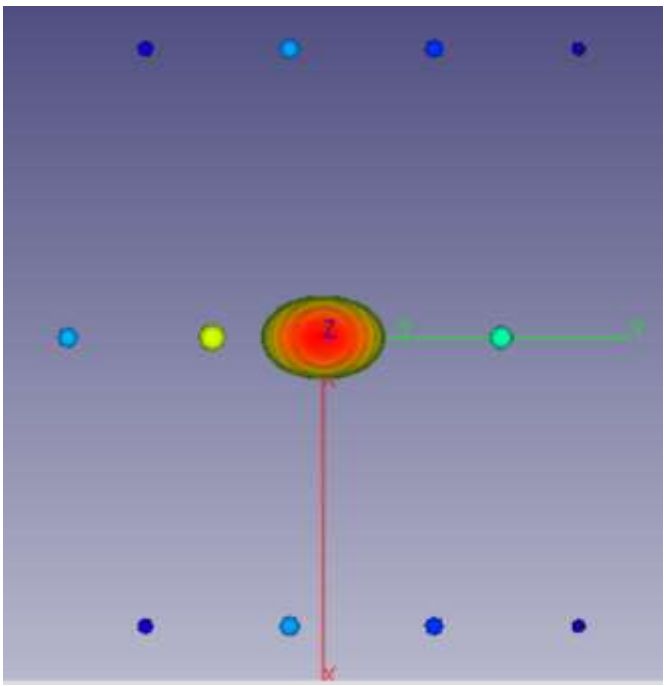


Рис. 10.17. Разреженное размещение элементов антенной решетки

10.4.2 Конфигурирование дифференциально-разностной ДН антенной решетки

В дереве проекта кликните узел ***Weights/Array Rendering***.

Установите следующие углы направления излучения ФАР:

- ***Main Beam Azimuth*** = 0°
- ***Main Beam Elevation*** = 45°

Установите ***Difference Pattern*** как ***Horizontal***. Это инвертирует фазу антенной решетки поперек оси x от y < 0 до y >= 0, создавая разностную ДН (рис. 10.18).

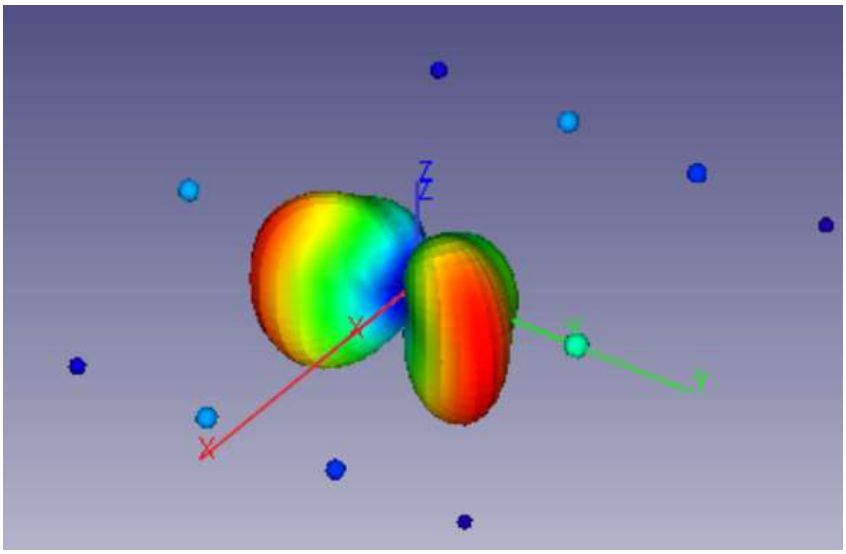


Рис. 10.18. Разностная ДН антенной решетки

При подготовке для моделирования, вернитесь к следующей конфигурации:

Панель узла ***Antenna Array 1***:

- **Design Frequency**: 1 GHz
- ***Length (Wavelengths)*** и ***Width (Wavelengths)***: 1.0
- ***Length Spacing (Wavelengths)***: 0.5
- ***Width Spacing (Wavelengths)***: 0.25
- ***Arrangement*: *Vertical Stagger***
- ***Stagger Angle***: 15°
- ***Symmetry*: *Vertical***

Панель узла ***Weights/Array Rendering***:

- ***Aperture Taper*: *Flat***
- ***Difference Pattern*: *None (Sum Pattern)***
- ***Main Beam Azimuth***: 0°
- ***Main Beam Elevation***: 90°

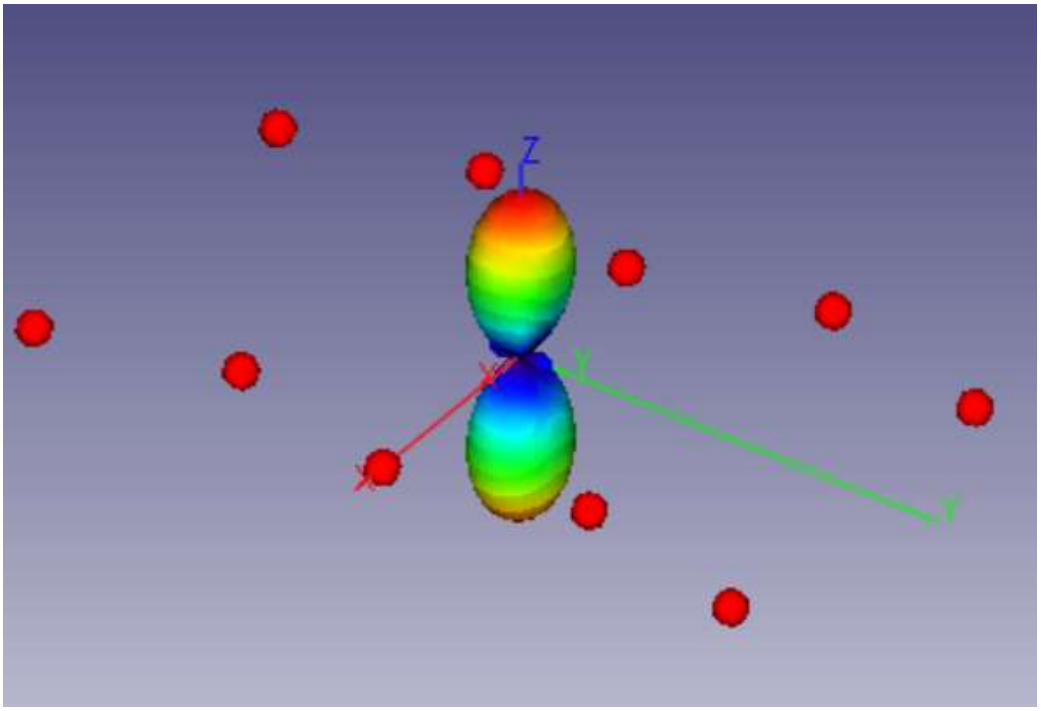


Рис. 10.19. ДН антенной решетки при синфазном возбуждении

10.5 Антенная решетка над земляной платой

Используем готовый файл (***.facet***) для создания в проекте земляной плоскости 3 m x 3 m (рис. 10.20). Для этого в главном меню ***Savant***, кликните кнопку *Add CAD*. Найдите директорию ***Tutorial8*** и выберите ***ground_plane.facet***. Появится диалог, в котором можно выполнить

масштабирование размера от метров к другим единицам. В данной модели CAD единицы метры, так что кликнем ***Cancel***.

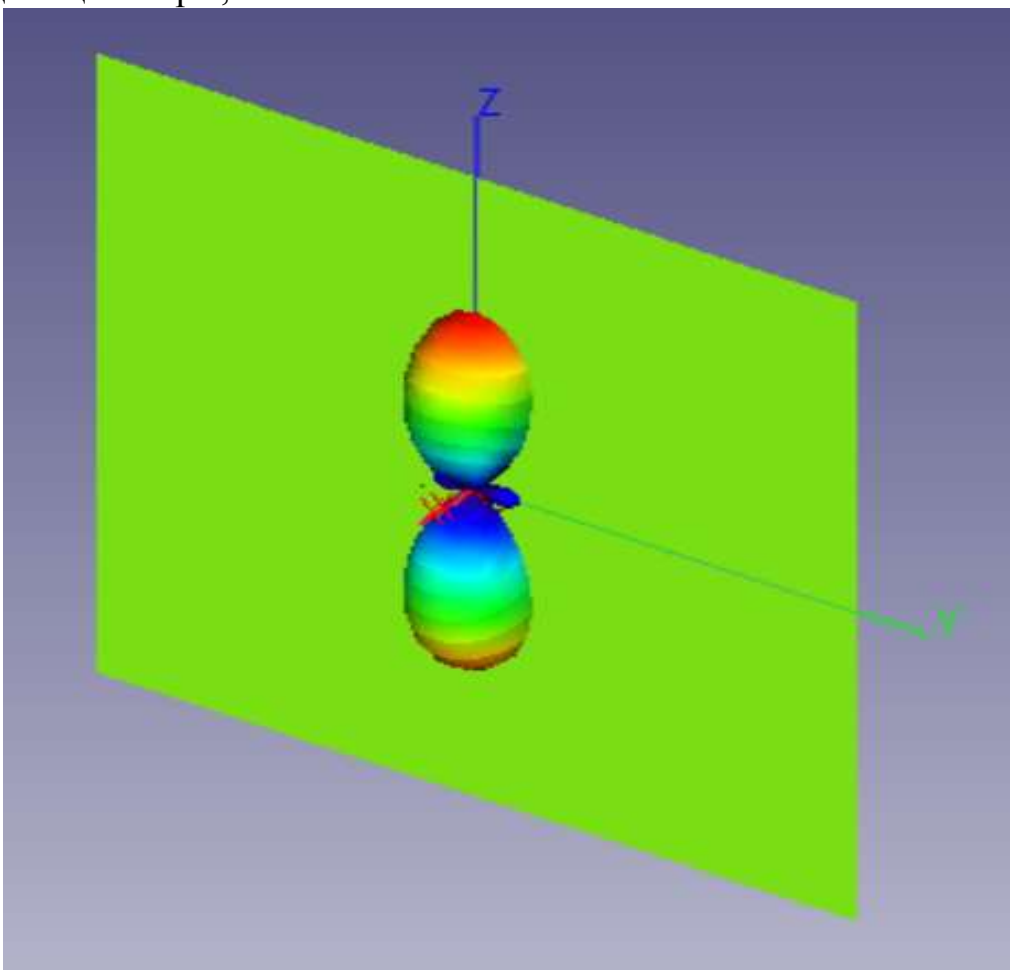


Рис. 10.20. ДН антенной решетки над плоскостью

Кликните на кнопку ***Save Project*** в инструментальной линейке.

10.5.1 Размещение и ориентация решетки над земляной платой

Выполним моделирование антенной решетки на частоте 1 GHz, расположенной на высоте $\lambda/4$ над земляной платой. В результате получим диаграмму излучения антенной решетки, поскольку мы используем элемент электрического диполя, который параллелен земляной плате (рис. 10.21).

Выберите узел ***Antenna Array 1*** в дереве проекта. Разверните панель ***Position*** и установите положение элемента решетки на (X,Y,Z) = (0.075, 0.0, 0.0). Это положение соответствует $\lambda/4$ над земляной плоскостью (расположенной при x=0) на запланированной частоте моделирования 1 GHz.

Разверните панель ***Orientation*** и установите (***Roll,Pitch,Yaw***) на значения (0,90,0) (degrees). Апертура решетки теперь параллельна земляной плоскости.

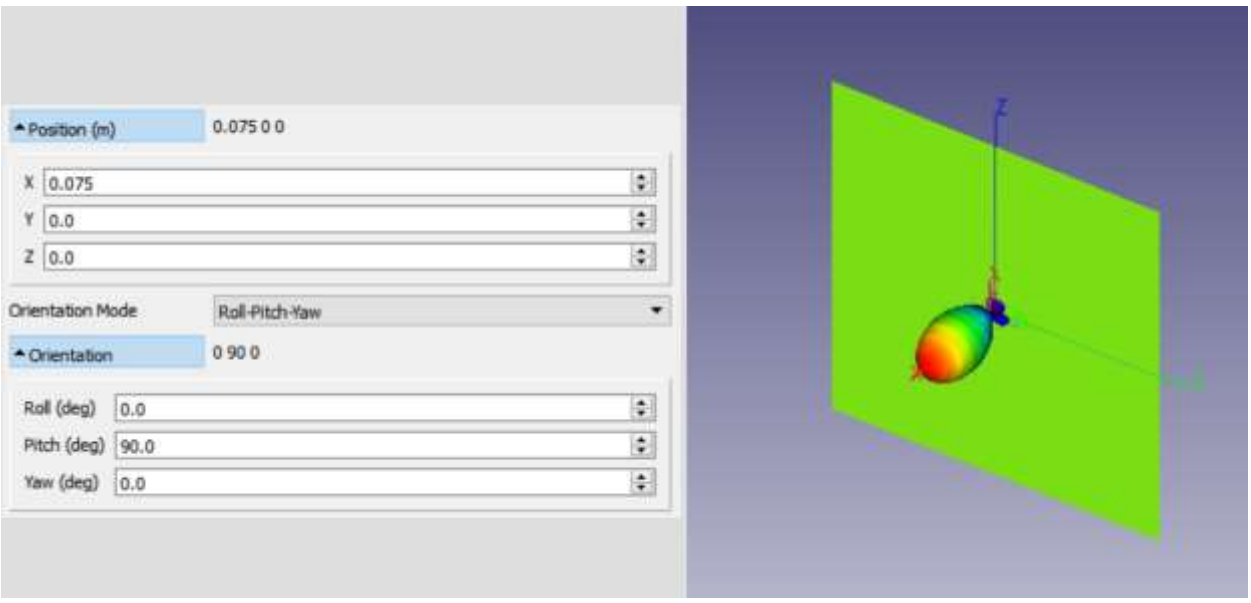


Рис. 10.21. Установка положения и ориентации ФАР

10.6 Конфигурация области углов дальнего поля и установки на расчет антенной решетки

На этом шаге мы будем конфигурировать ***Savant*** для предсказания ДН дальнего поля по всей сфере углов. Выберите узел ***Analysis*** в дереве проекта. Установите ***Analysis Type*** на ***Far-Field Pattern***.

10.6.1 Спецификация передающей антенны (Tx)

В панели свойств узла ***Analysis***, кликните на селектор для ***Tx Antenna***. Выберите ***Antenna Array 1*** для ***Tx Antenna***.

Трехмерная ДН от каждого элемента решетки конфигурировалась ранее, используя весовые функции лучей, которые возбуждаются от каждого элемента, созданного в узле ***Scene***.

Конфигурация области углов дальнего поля

Выберите узел ***Far-Field*** в дереве проекта. Кликните на появляющийся селектор ***Far-field Type*** и выберите ***Sector***.

Разверните панель ***Azimuth Range (degrees)***. Установите ***Azimuth Range Start***, ***Stop***, и ***Number of Steps*** равными 0°, 180°, и 36, соответственно. Разверните панель ***Elevation Range (degrees)*** и установите ***Start***, ***Stop***, и ***Number of Steps*** равными -270°, 90°, и 120, соответственно (рис. 10.22).

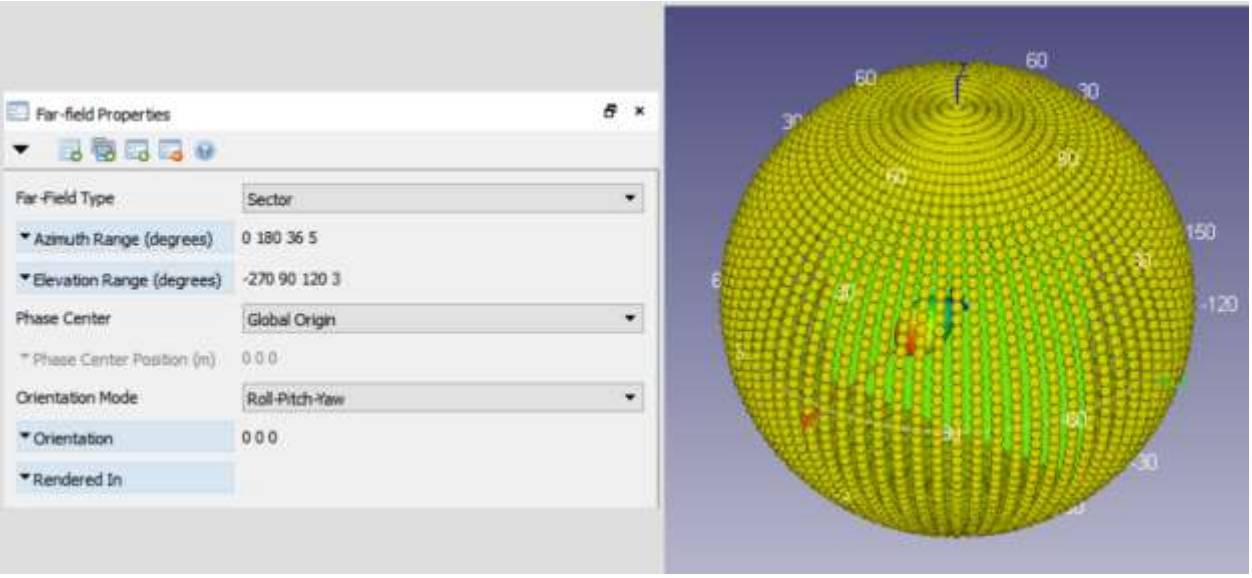


Рис. 10.22. Конфигурация расчета ДН в дальней зоне

Кликните кнопку ***Save Project***.

10.6.2 Конфигурация установки частот

Выберите узел ***Analysis:Frequency***. В панели свойств, задайте следующие установки: ***Domain Type***: ***Single; Frequency***: 1 GHz (рис. 10.23).

Рис. 10.23. Выбор частоты

10.6.3 Конфигурация методологии и вывода данных

Выберите узел ***Analysis:Methodology*** Задайте следующие установки на его панель (рис. 10.24):

- ***Ray Density (per wavelength)***: 5.0
- ***Max Number of Bounces***: 1

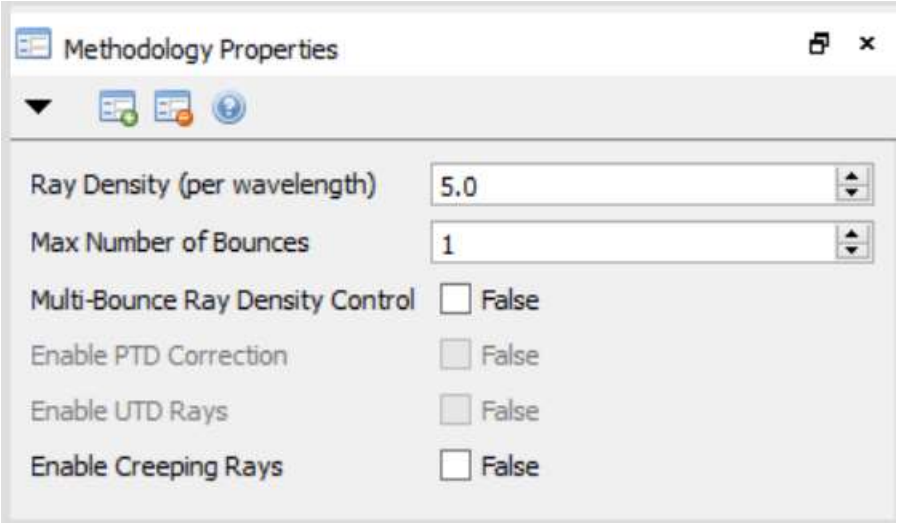


Рис. 10.24. Выбор плотности лучей

10.7 Запуск моделирования и вывод результатов

Кликните кнопку ***Run Analysis***. Бар прогресса расчета будет показывать, на каком этапе и какие затраты времени. Расчет закончится через несколько секунд.

Когда моделирование завершается, угол наблюдения маркеры в 3D - окне сцены станут цвета - в масштабе с результатами (рис. 10.25). Кроме того, теперь под узлом ***Results*** в дереве проекта появляется узел ***Analysis***: ***Far-Field***. Обратите внимание, что этот узел отличается от узла анализа: узел дальнего поля, где углы наблюдения были заданы на шаге 5.

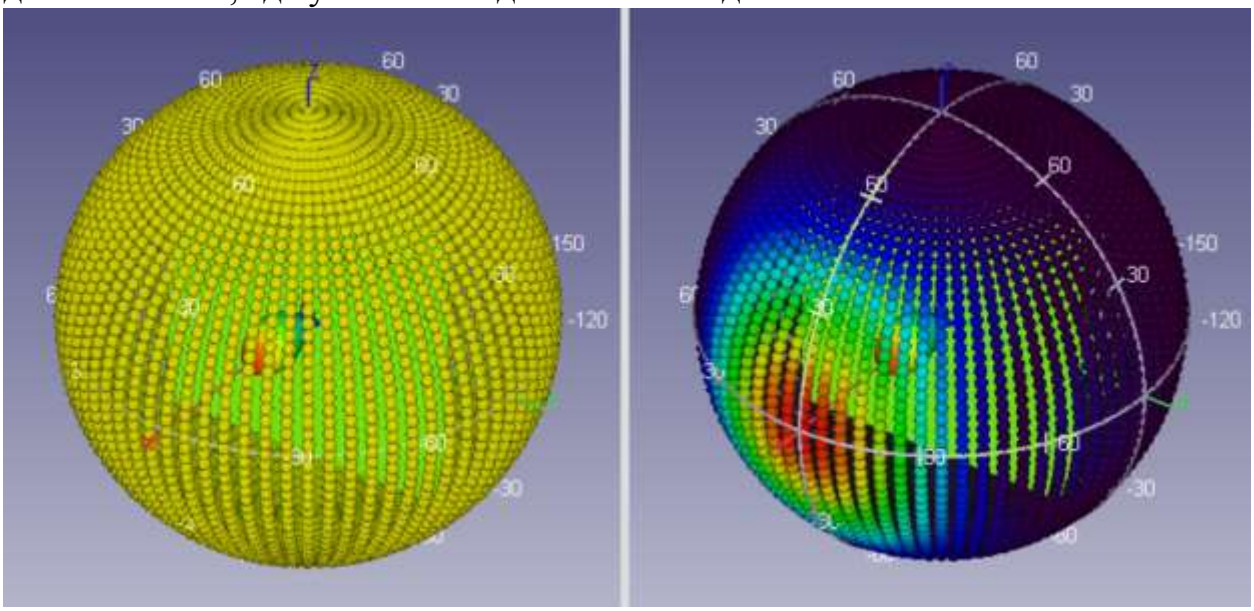


Рис. 10.25. ДН антенной решетки на поверхности круга

В этот момент результаты моделирования не сохраняются.

Сохраните проект. Результаты теперь сохранятся в папке проекта ***Tutorial8.savant***.

10.7.1 Вывод результатов расчета ФАР

Кликните на узел ***Windows*: *3D - Scene*: *Far-Field*** и включите ***View as Radiation Pattern***. Выводится трехмерная ДН моделируемой антенной решетки (рис. 10.26).

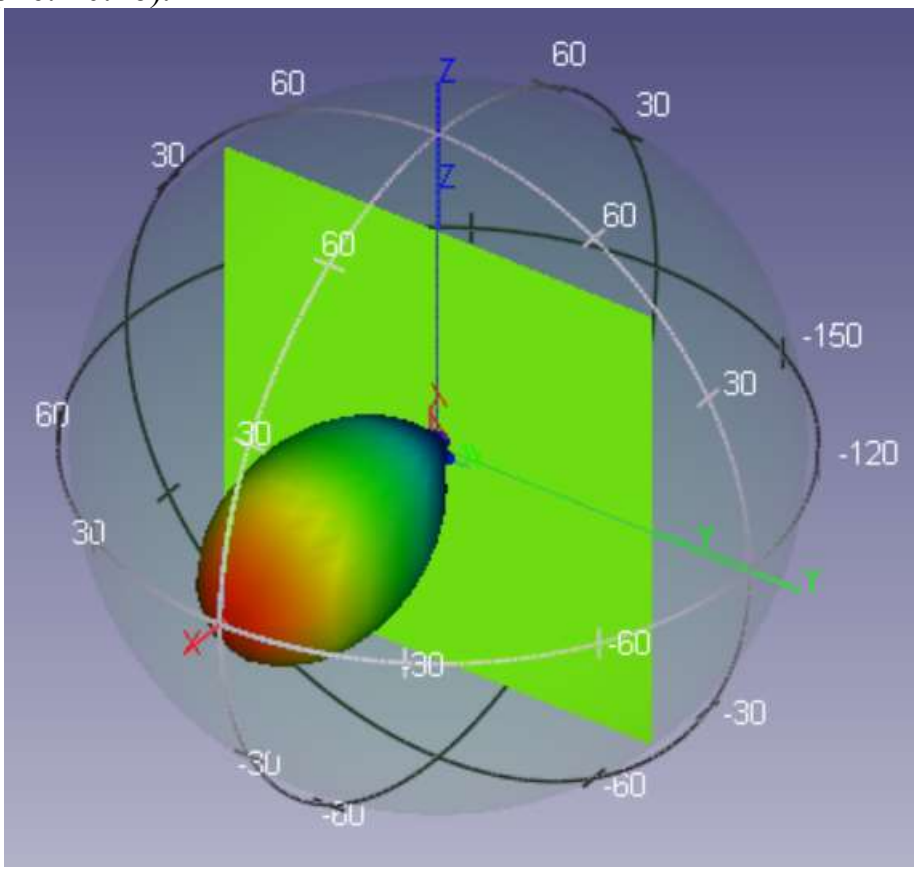


Рис. 10.26. ДН антенной решетки

Кликните на узел результатов ***Results*: *Far-Field*** и выберите ***Polar Plot***. Появляются результаты в полярной системе координат.

Выберите узел ***Plot-Trace*** (***Polar Plot:Total Composite-pol)***, который появился теперь в дереве проекта. Кликните дважды в инструментальную линейку над панелью свойств. Это создание новый узел ***Plot Trace,*** названный ***Total Composite-pol 2***. Измените опцию ***Scale*** на ***Decibel***

Сконфигурируйте каждый узел характеристики чтобы показать различные ***Result Component***, один для ***Total***, другой для ***Incident Field***. Конфигурация полярного графика так, чтобы диапазон данных был между *80* dB и *20* dB (рис. 10.27).

В узле ***Polar Plot***, вы должны установить ***Radial Range (dB)*** = 100 dB и затем установить ***Radial Max*** = 20 dB.

Сконфигурируйте график для обоих линий, чтобы они виделись, как на следующем графике, разными цветами.

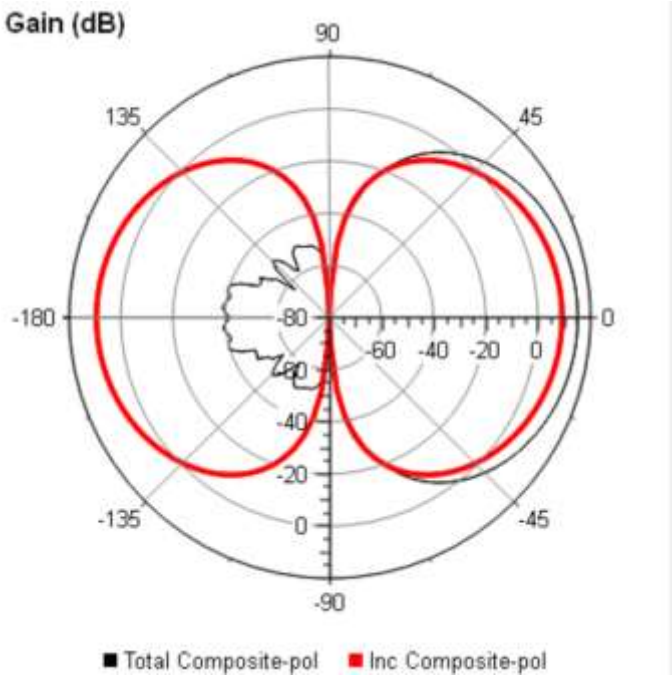


Рис. 10.27. Сечение диаграммы направленности

Результаты, полученные с помощью функции множителя решетки, в данном случае могут быть получены с помощью эквивалентного файла ***current-source***, где элемент ***current-source*** повторяется в тех же положениях, что и элементы антенной решетки.

10.7.2 Перезапуск на расчет вне диапазона частот, в котором работает антенная решетка

Целью следующего шага является показать различия между ***Simulation Frequency***, заданный в узле ***Frequency***, и ***Design Frequency***, заданный в узле ***Array Antenna***.

Выберите узел ***Analysis:Frequency*** в дереве проекта и установите ***Frequency*** = *1.5* GHz. В диалоге, который появится, удалите существующие результаты. Кликните кнопку ***Run Analysis*** на инструментальной линейке.

Повторите шаг 10.6.2.

Вы должны получить результат, как показано на рис. 10.28б. Результаты при 1 GHz показаны на рис. 10.28а для сравнения.

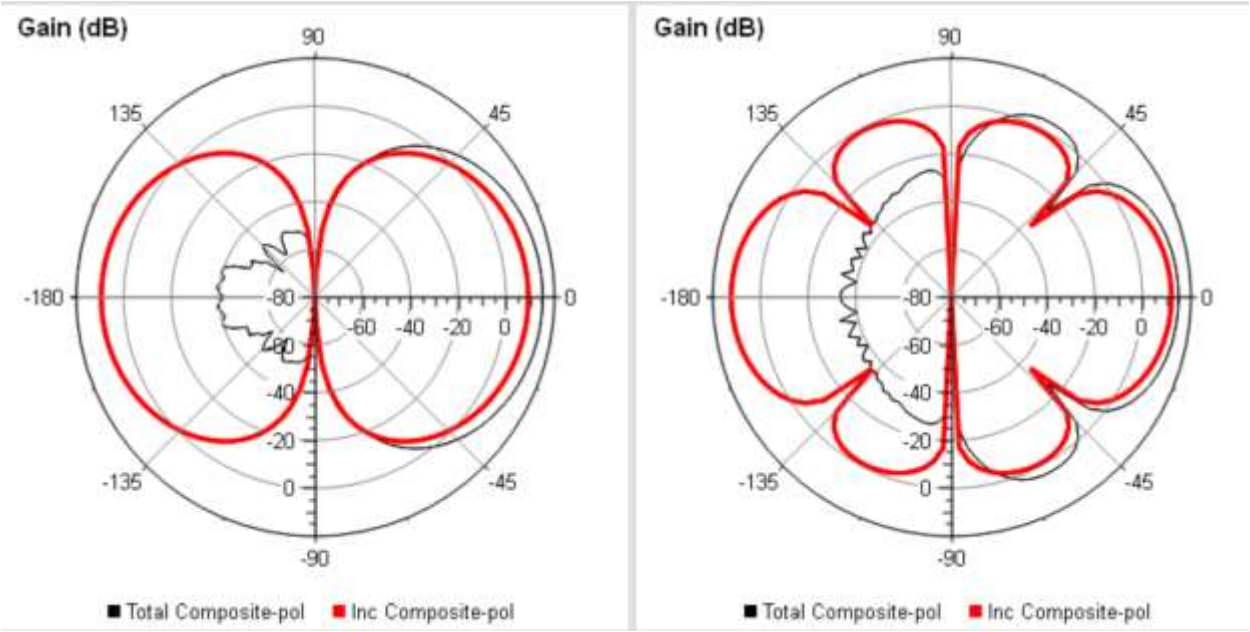


Рис. 10.28аб. Диаграммы направленности на разных частотах

Даже если решетка была спроектирована для работы на частоте 1 GHz, вы можете выполнить моделирование ее на другой частоте вне рабочей полосы.

11 МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ НА КОРАБЛЕ МЕТОДОМ ТЕОРИИ ДИФРАКЦИИ

В данном разделе для генерирования лучей используется метод теории дифракции и токи на ребрах структуры. Сначала рассмотрим простую задачу, показывающую, как метод ***UTD*** согласуется с электродинамическим решением. Затем показано влияние функции ***UTD*** на картину излучения, для более крупной реальной модели ***CAD***.

В примере выполняется исследование и расчет лучей дифракции на ребрах методом ***UTD*** в ***Savant.***

Шаги этого примера:

1. Создание модели ***CAD*** с двумя плоскостями ***PEC.***
2. Выделение ребер в модели ***CAD.***
3. Запуск на расчет и сравнение результатов расчета на программе ЭД моделирования.
4. Визуализация лучей ***UTD.***
5. Исследование свойств лучей ***UTD*** на модели корабля.

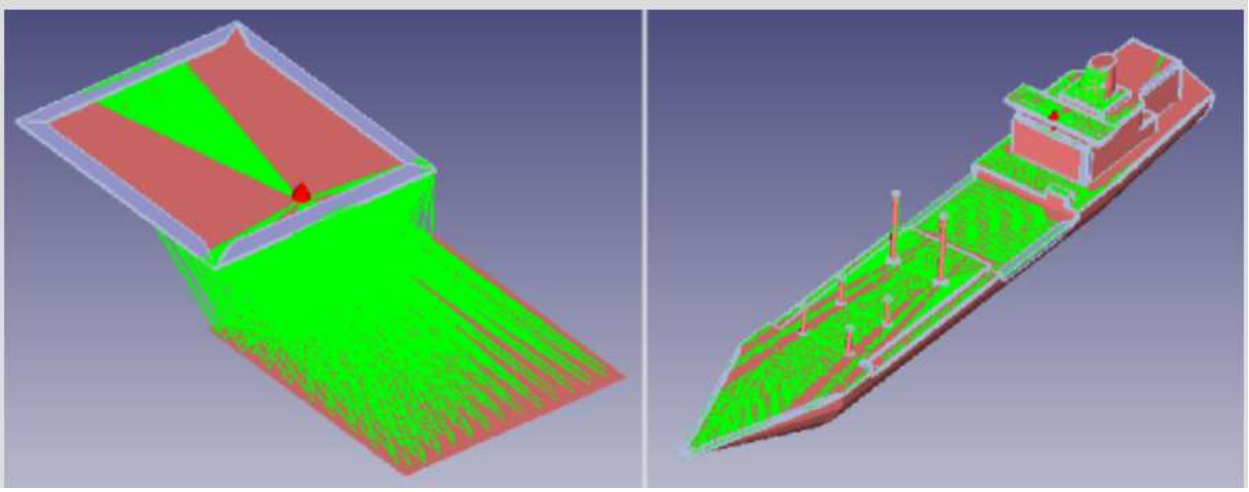


Рис. 11.1. Примеры структур, которые моделируются методом ***UTD***

11.1 Создание CAD модели состоящей из двух PEC плат

Создадим новый проект ***Savant***. Нажмите правой кнопкой на узел ***Scene*** и выберите ***Add Parametric CAD.***

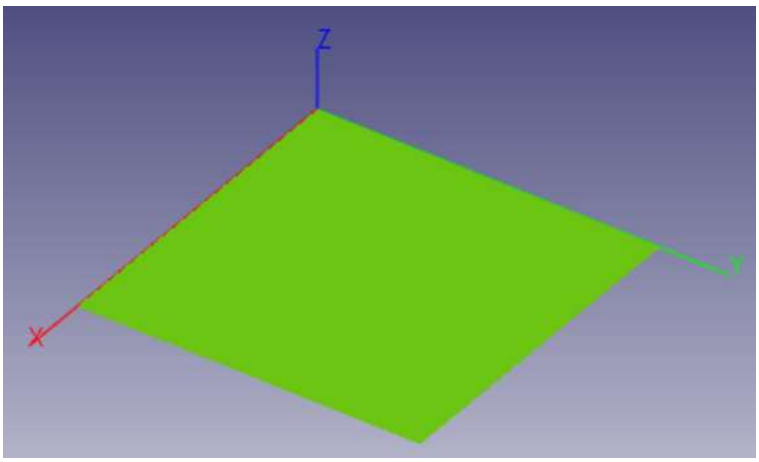


Рис. 11.2. Параметрическая плоскость CAD

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Plate*** и командой ***Rename*** переименуйте узел на ***Top Plate.***

Выберите узел *Top Plate* CAD. В панели свойств разверните папку *Parametric Model*. Установите размеры планы 4 м x 4 м в глобальной системе (рис. 11.3).

Разверните папку ***Rendering***. В меню ***Color by*** выберите ***Entire Model*** и отключите опцию ***Show Axes*** в узле свойств.

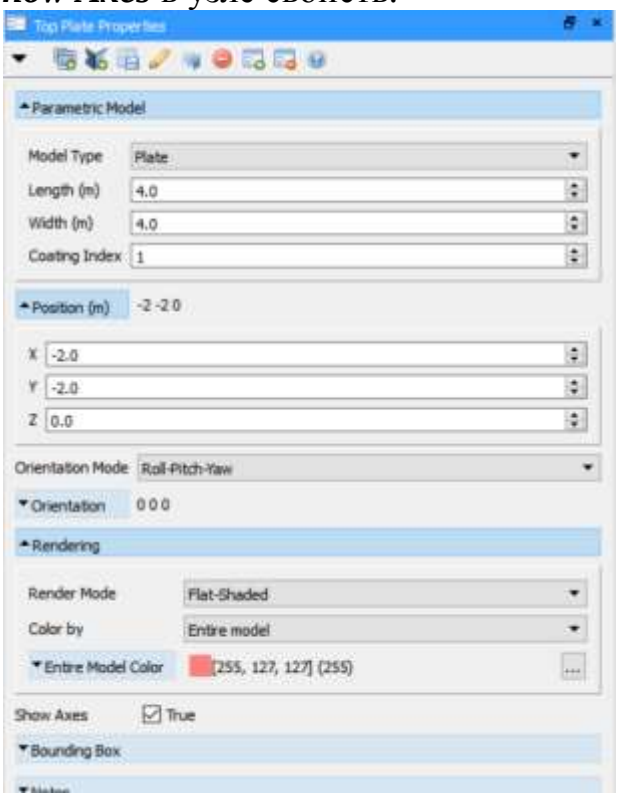


Рис. 11.3. Параметры первой плоскости

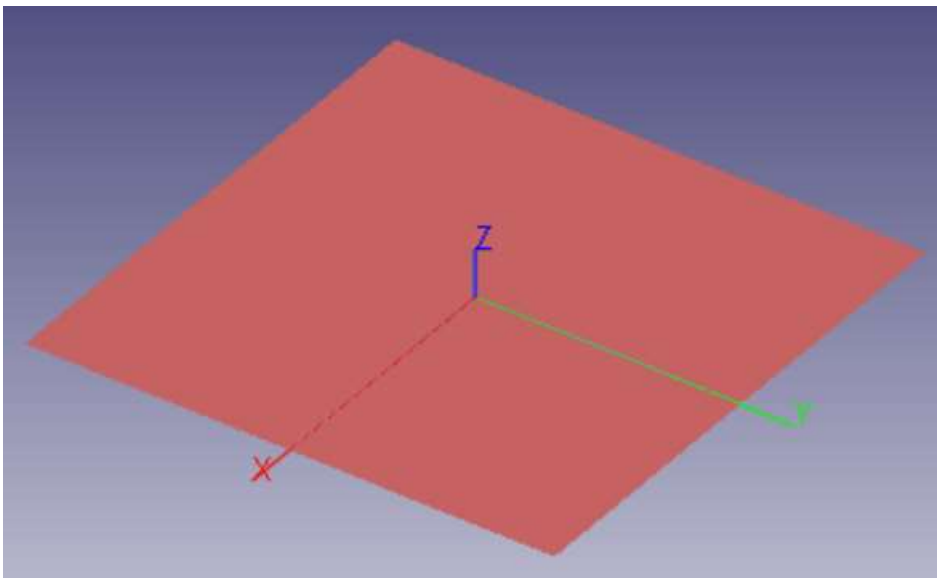


Рис. 11.4. Первая созданная плоскость с началом координат в центре

Сохраните проект как ***Tutorial9_plt.savant*** внутри директории ***Tutorial9.***

11.1.1 Выделение ребер на верхней плате

Кликните правой кнопкой мыши узел ***Top Plate*** и выберите опцию ***Add Wedges.*** Выберите узел ***Top Plate-wedges***. В панели свойств, включите опции ***Rebuild Edges*** и ***Include Knife Edges*** (на рис. 11.5 они отключены).

Savant автоматически найдет клинья в ***CAD*** модели и представляет их в виде серых полосок. В этом примере у нас есть только острые ребра (***knife edges)***, что означает клинья с внешними углами 360°.

Отключите режим ***Rebuild Edges***. Это всегда нужно сделать после извлечения клиньев, чтобы любые будущие редактирования их не были переопределены. Отключите ***Show Axes.***

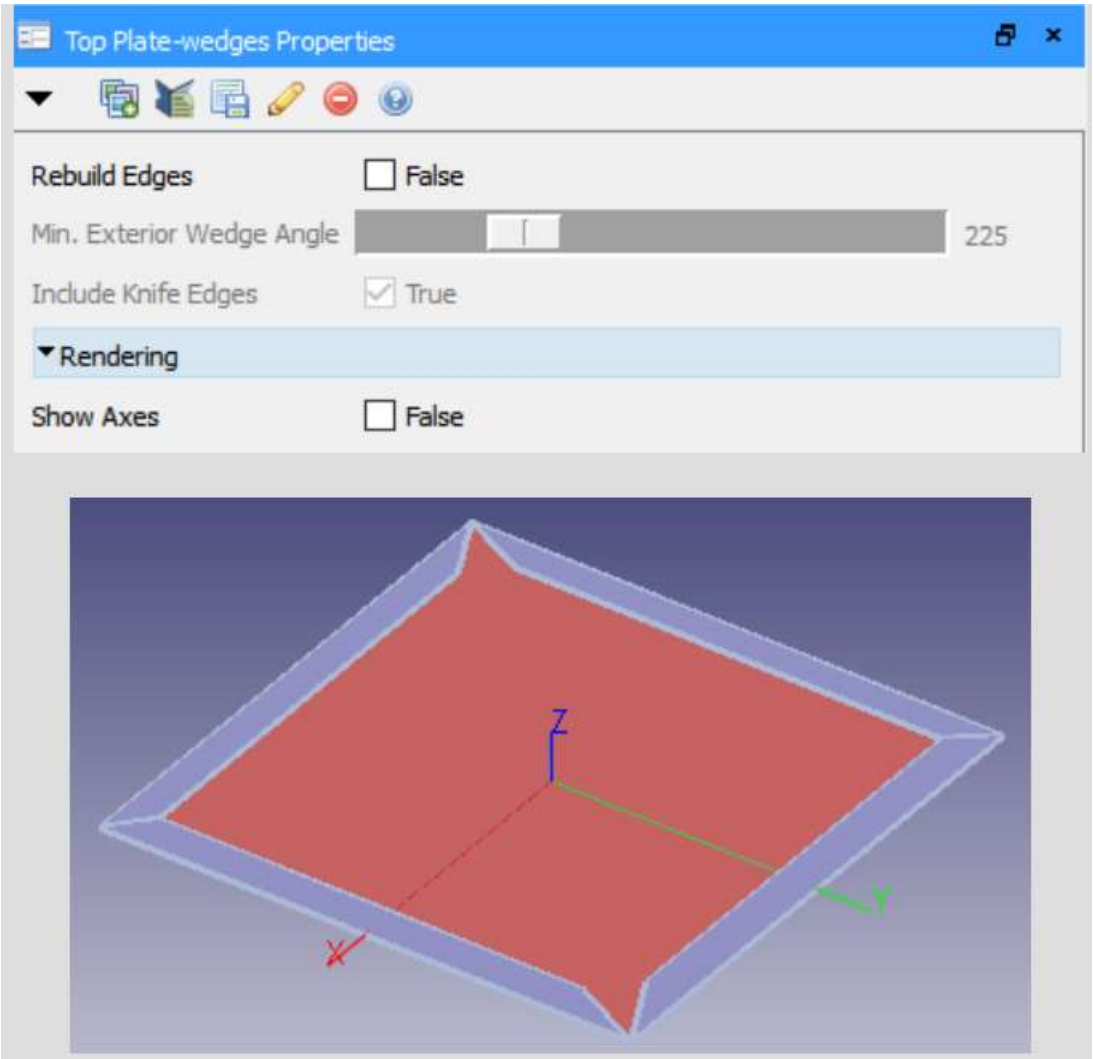
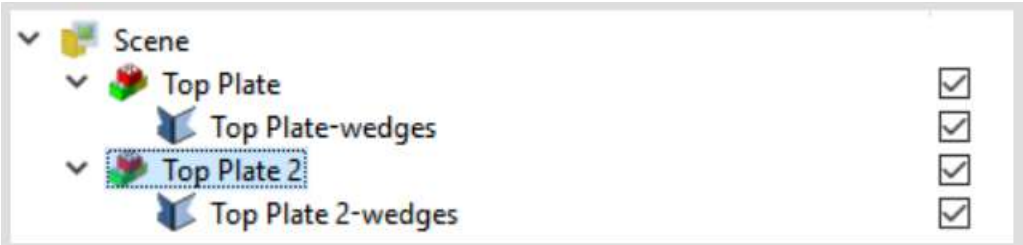
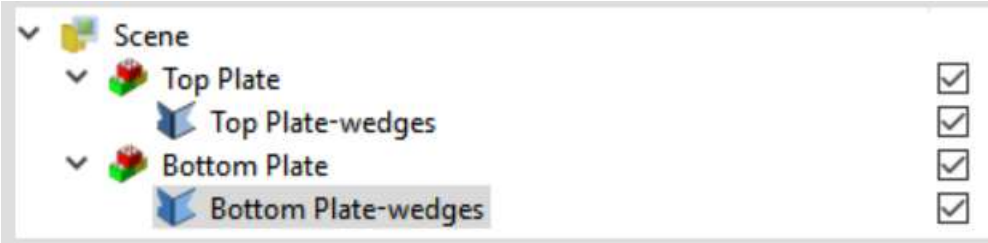


Рис. 11.5.Выделение ребер платы

11.1.2 Создание нижней платы

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Top Plate*** и выберите ***Duplicate***. Этим создается второй параметрический ***CAD*** узел, ***Top Plate 2***, под узлом ***Scene***. Назовите этот второй узел как ***Bottom Plate***. Измените имя дочернего узла на ***Bottom Plate-wedges***.





Выберите узел ***Bottom Plate CAD***. В панели свойств, разверните папку ***Position*** и установите *X*: -2.0, *Y*: 2.0, *Z*: -1.0 (рис. 11.6).

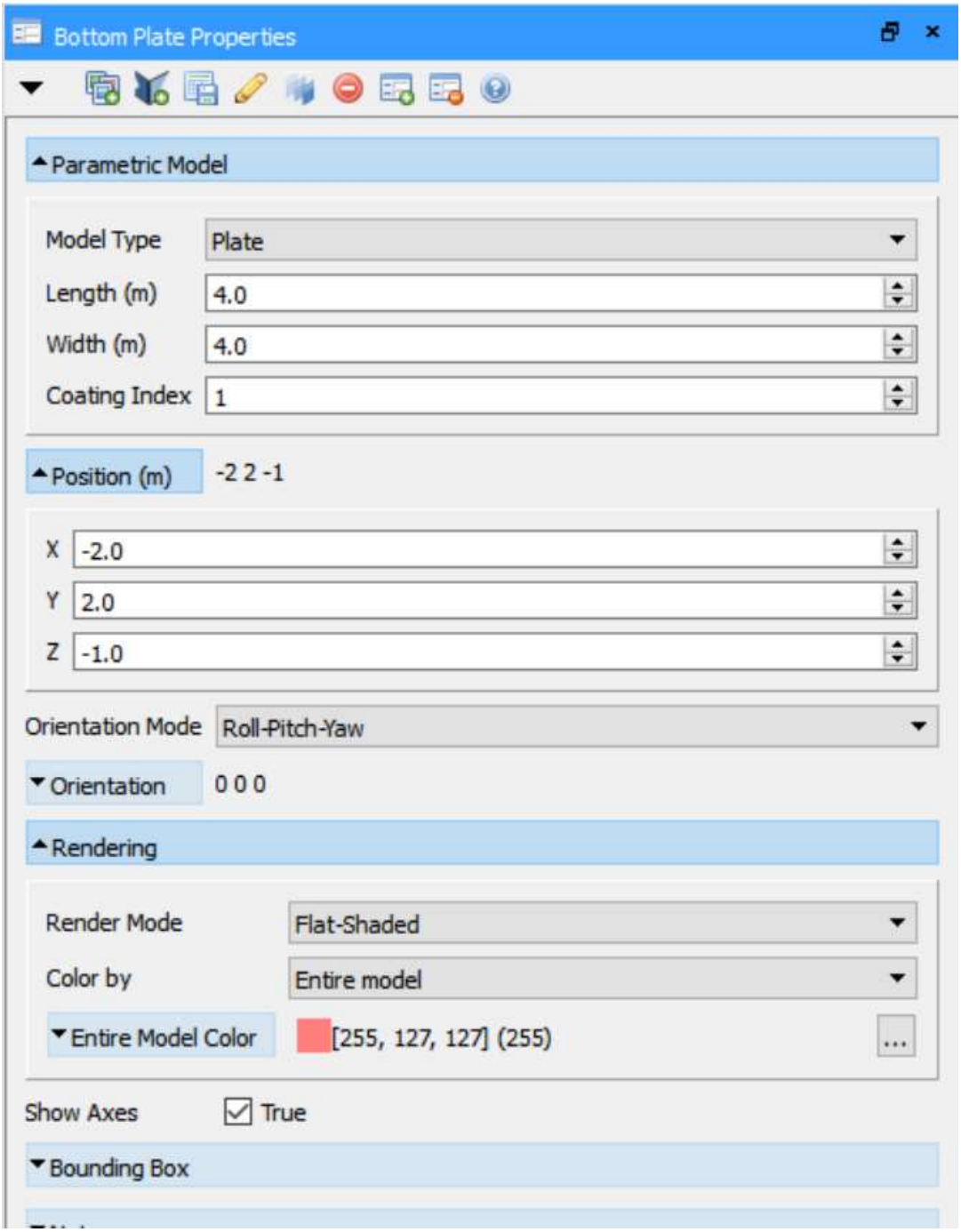


Рис. 11.6. Положение и размер второй платы

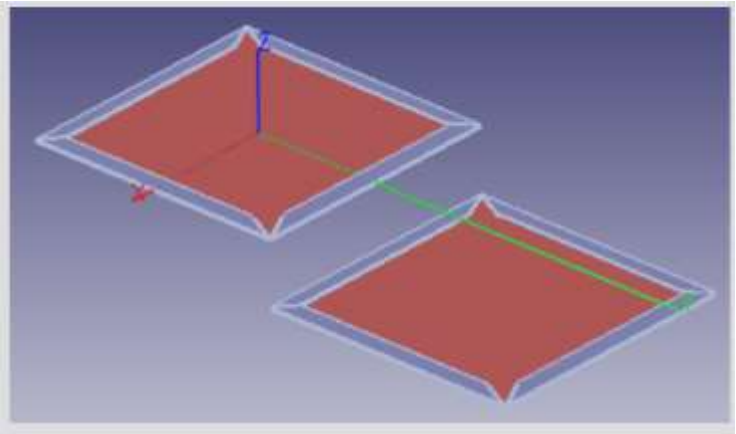


Рис. 11.7. Две плоскости

11.2 Размещение монопольной антенны сверху платы

Добавим монопольную антенну командой ***Add Antenna*** в главном меню. Создается узел ***Antenna 1*** под узлом ***Scene.*** Выберите узел ***Antenna 1*** и установите ***Type =Wire Monopole***. Установите ***Wire Length*** = 0.1 м и ***Resonant Frequency*** = 0.749481 ГГц (рис. 11.8).

Установите ***Antenna Representation*** как ***Current Sources*** и ***Current Density Oversample*** = 1.0.

Разверните папку панели ***Position*** и сконфигурируйте данные как

- *X*: 0.0
- *Y*: 1.5
- *Z*: 0.0

Отключите ***Show Axes*** в панели свойств узла.

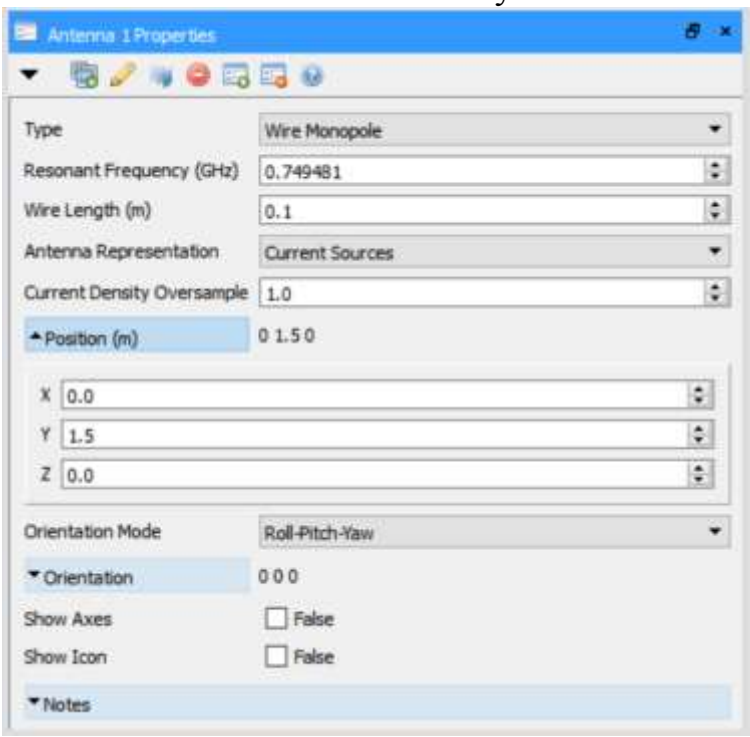


Рис. 11.8. Параметры антенны

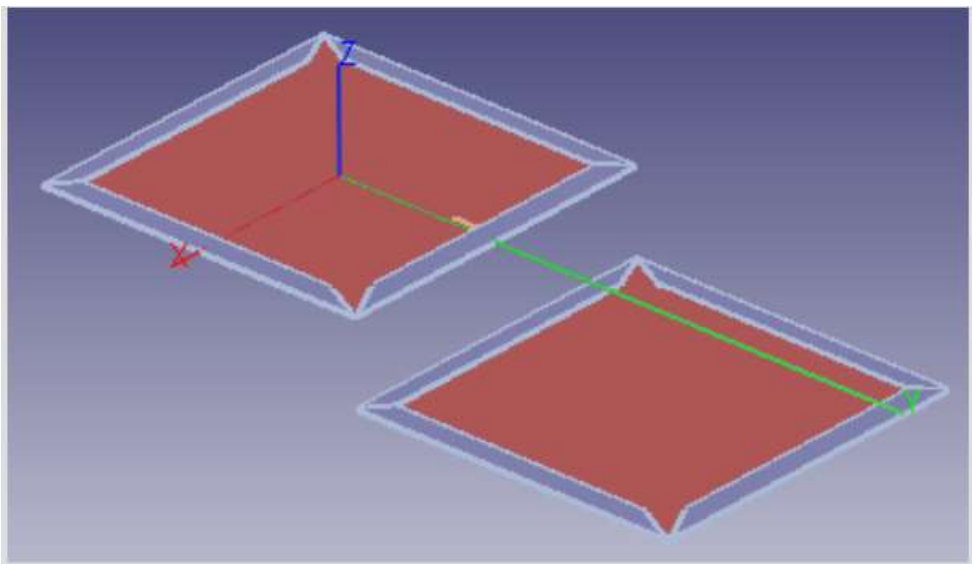


Рис. 11.9. Смещение антенны на первой плоскости

Дважды кликните на узел ***Antenna 1***. Открывается окно с именем ***3D - Antenna1***, в котором показаны токи на монопольной антенне и земляная плоскость ***Ground Plane*** (рис. 11.10).

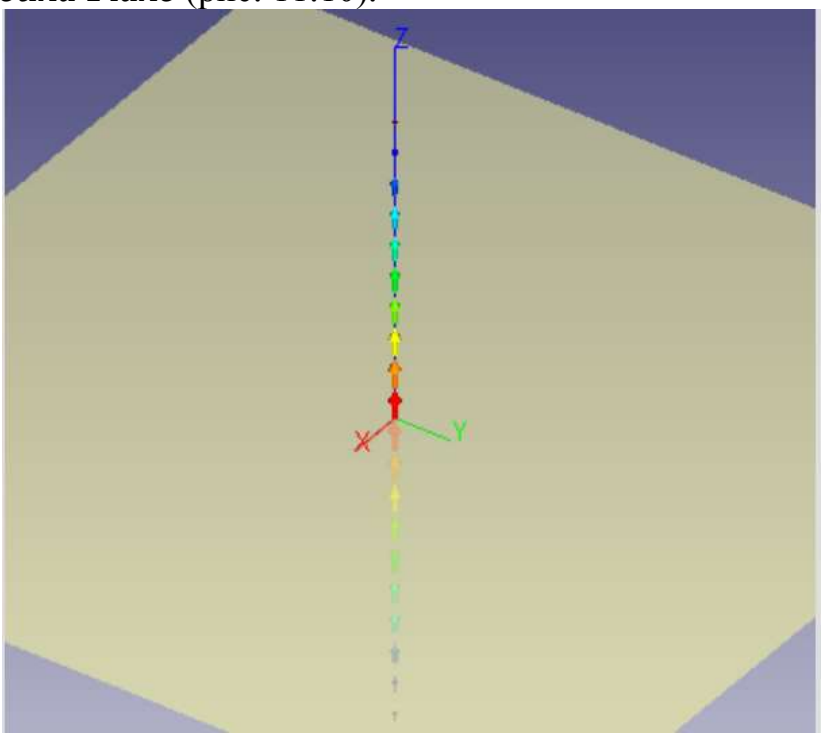


Рис. 11.10. Антенна Wire Monopole на земляной плоскости

Закройте окно ***3D window*** с именем ***3D - Antenna1***. Отключите кнопку ***Display Axis*** в инструментарии окна ***3D - Scene***. Это позже поможет нам с визуализацией (рис. 11.11).

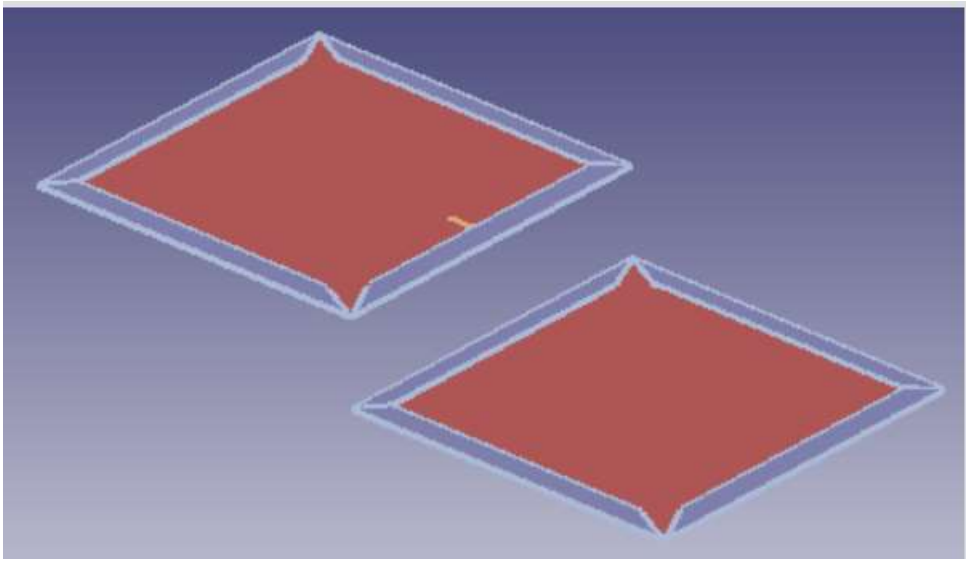


Рис. 11.11. Две плоскости и антенна на одной из них

11.3 Ручная настройка клиньев в модели CAD

Графический интерфейс **Savant** предоставляет несколько способов интерактивно настроить клинья на поверхности модели CAD. На этом шаге мы покажем, как интерактивно удалить некоторые клинья, которые были извлечены автоматически. Клинья могут быть по-отдельности удалены операций ***Ctrl-click*** или пакетного удаления (с помощью окна выбора).

Несмотря на то, что модель ***CAD***, созданная на шаге 1, достаточна для моделирования, мы удалим клинья на нижней панели, чтобы показать процедуру редактирования клина. Поскольку эти клинья не зависят от действия передающей антенны, их удаление не повлияет на результаты.

11.3.1 Удаление клиньев нажатием Ctrl

Выберите узел ***Bottom Plate-wedges***. Нажмите кнопку ***Edit Wedges*** в окне ***3D – Scene*** если он еще не высвечен.

Увеличьте изображение в окне ***3D – Scene*** так чтобы все четыре ребра на нижней плате были ясно видны. Точка положения курсора мыши сверху затененных частей - это точка одного из четырех ребер нижней платы (рис 11.12).

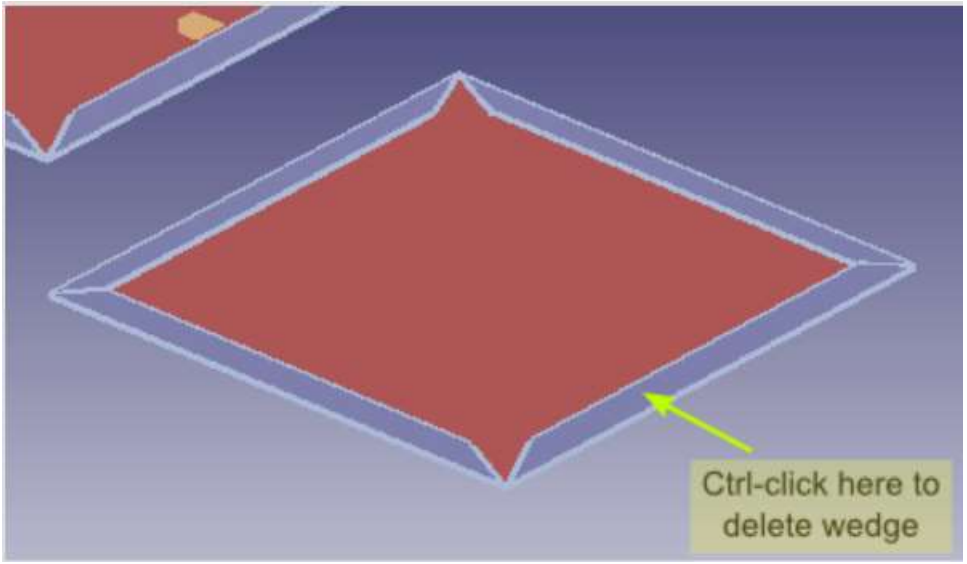
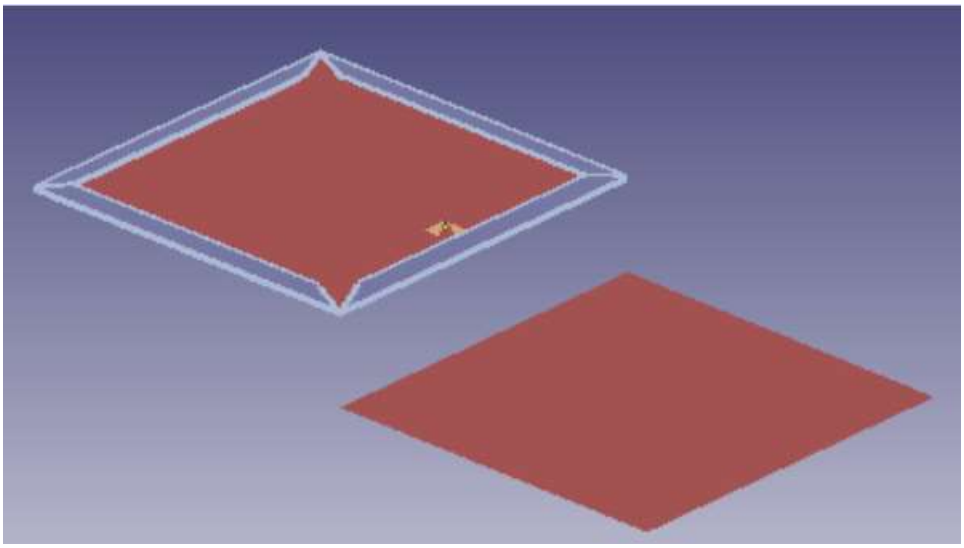


Рис. 11.12. Удаление клиньев

Удерживайте ключ ***Ctrl-key*** и кликните левой кнопкой мыши. Выделенное ребро удаляется. Повторите процесс удаления для следующих трех ребер нижней платы (рис. 11.13).



11.13. Удаление ребер растяжкой.

Покажем удаление ребра, используя другое свойство ***Savant***, которое позволяет сразу удалить несколько ребер с помощью объединения и растяжки.

Выберите узел ***Bottom Plate-wedges***. В панели свойств выберите опцию ***Rebuild Edges*** и ***Include Knife Edges***. ***Savant*** восстановит ребра на нижней плате (рис. 11.14).

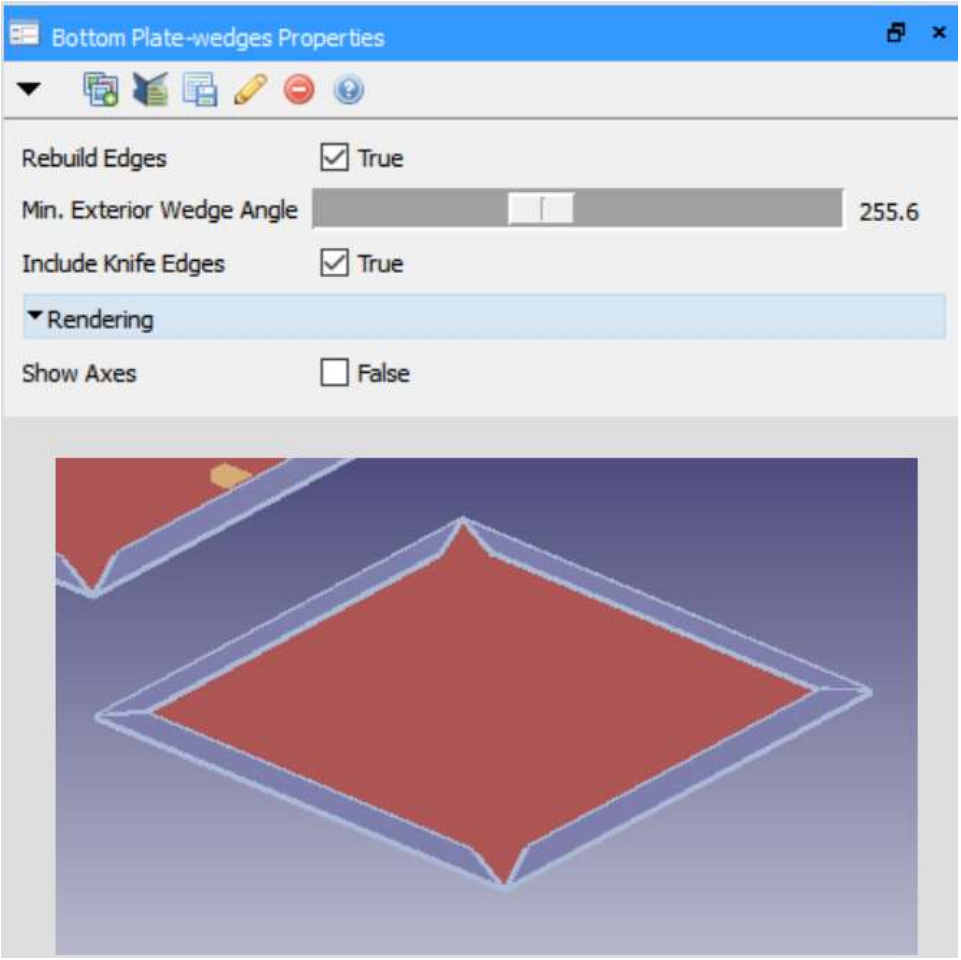


Рис. 11.14. Восстановление ребер на нижней плате

Отключите опцию ***Rebuild Edges***. Этим исключается удаление ребер из структуры.

Нажмите и удерживайте клавишу ***Ctrl***. Нажмите и удерживайте левую кнопку мыши.

Растягивайте прямоугольник так, чтобы он пересек несколько ребер. Красный прямоугольник, начерченный в виде внешней линии задает, где вы сначала кликните и текущее положение курсора мыши (рис. 11.15).

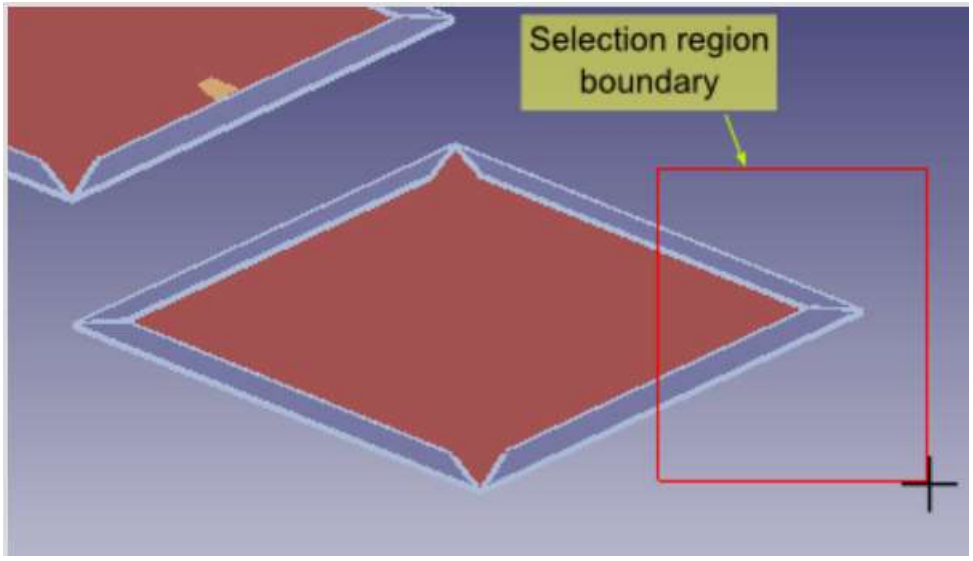


Рис. 11.15. Выделение ребер в области

Два ребра будут удалены, когда вы отпустите кнопку мыши.

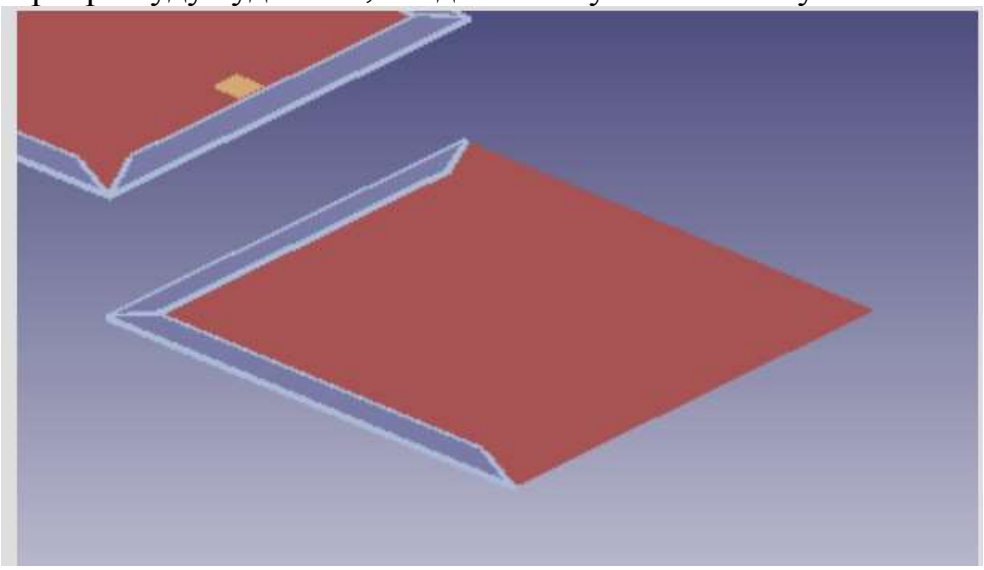


Рис. 11.16. Выделение ребер

Ребра содержатся внутри области растяжения и удалены, если одна конечная точка попадает внутрь растянутого бокса выделения (рис. 11.6).

Удалите оставшиеся два ребра выделением растягивающейся области как показано на рис. 11.17.

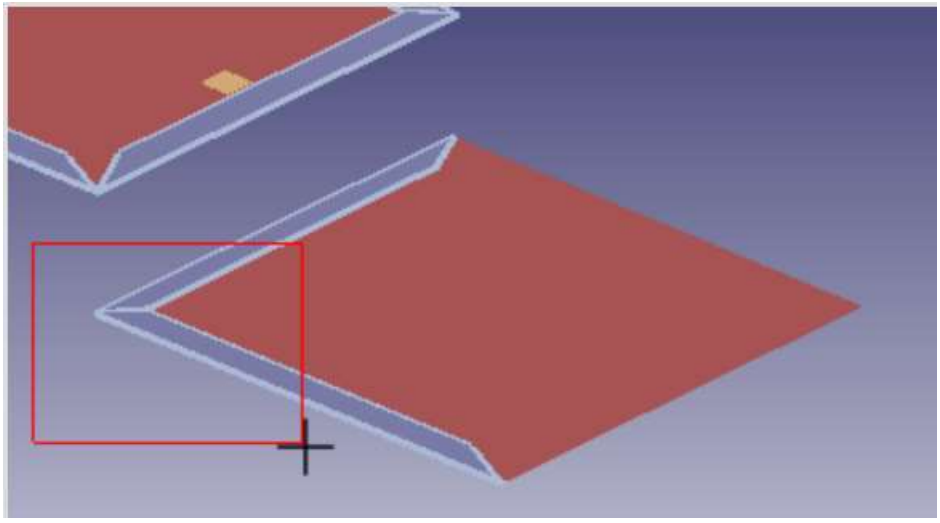


Рис. 11.17. Выделение и удаление ребер

После удаления ребер, модель будет иметь вид рис. 11.18.

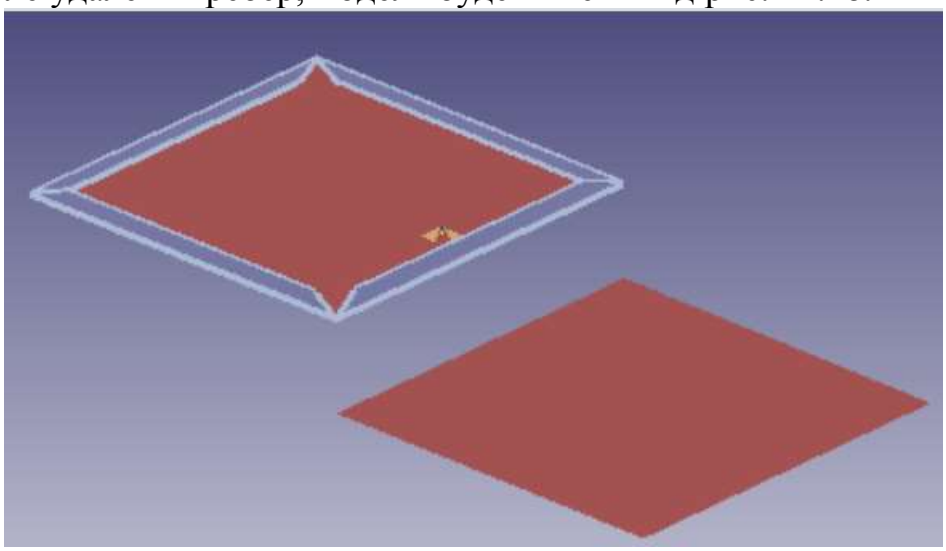


Рис. 11.18. Результирующая структура

11.4 Запуск моделирования и сравнение с результатами полно-волнового электродинамического расчета.

11.4.1 Задание характеристик дальнего поля

Выберите узел ***Analysis***. Измените ***Analysis Type*** на ***Far-Field Pattern.*** Выберите ***Antenna 1*** как ***Tx Antenna*** (рис. 11.19).

Выберите узел ***Far-Field***. Измените ***Far-field Type*** на ***Elevation Cut***. Разверните ***Elevation Range*** и сконфигурируйте ее следующим образом:

- ***Start*** = -90
- ***Stop*** = 270
- ***Number of Steps*** = 360

Установите ***Fixed Azimuth*** = 90°.

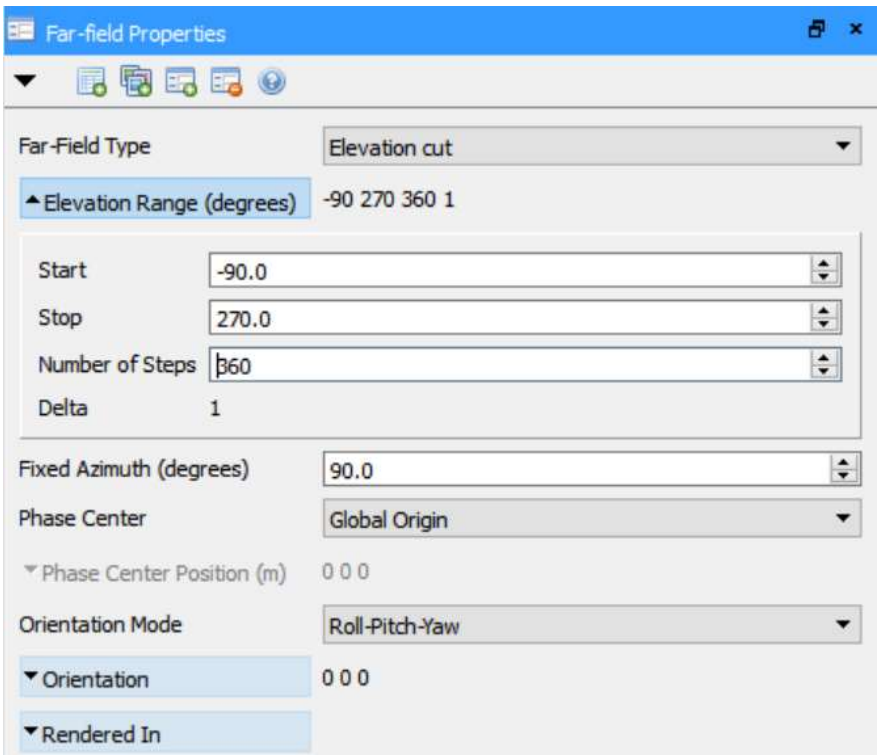


Рис. 11.19. Выбор параметров расчета дальнего поля

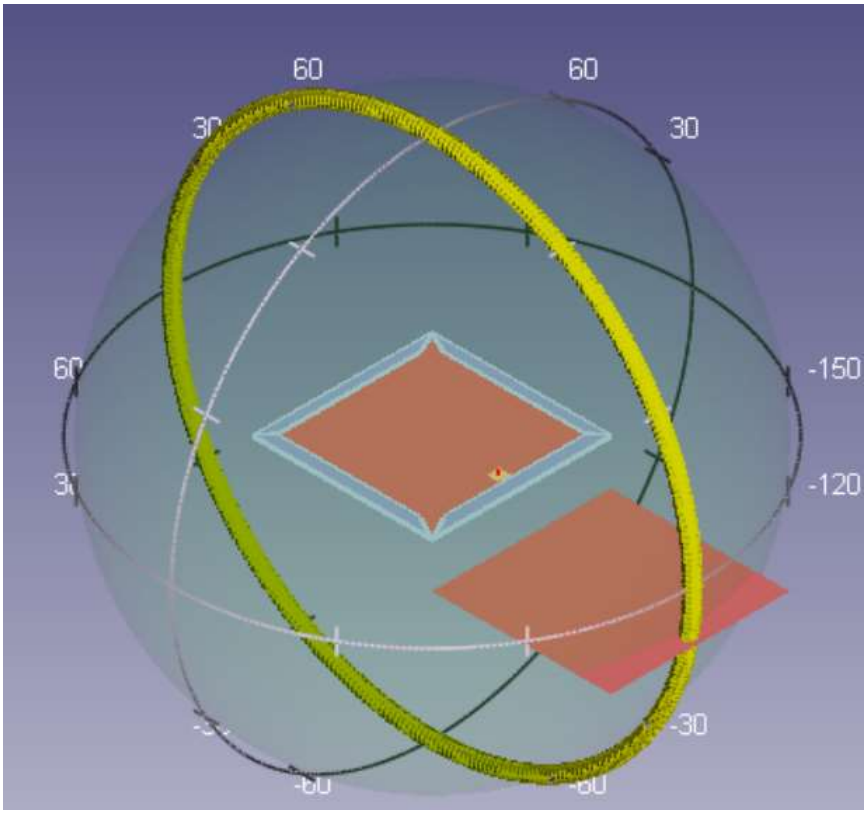


Рис. 11.20. Сечение ДН (кольцо), на котором будут высвечиваться результаты расчета дальнего поля

Выберите узел ***Analysis:Frequency***. Установите ***Domain Type*** на ***Single*** и ***Frequency*** = 1 GHz.

11.4.2 Запуск моделирования с UTD лучами и вывод результатов

Запустим моделирование без лучей ***UTD***. Они будут добавлены в решение позже, чтобы продемонстрировать уточнение решения.

Выберите узел ***Methodology*** и сконфигурируйте его как показано на рис. 11.21.

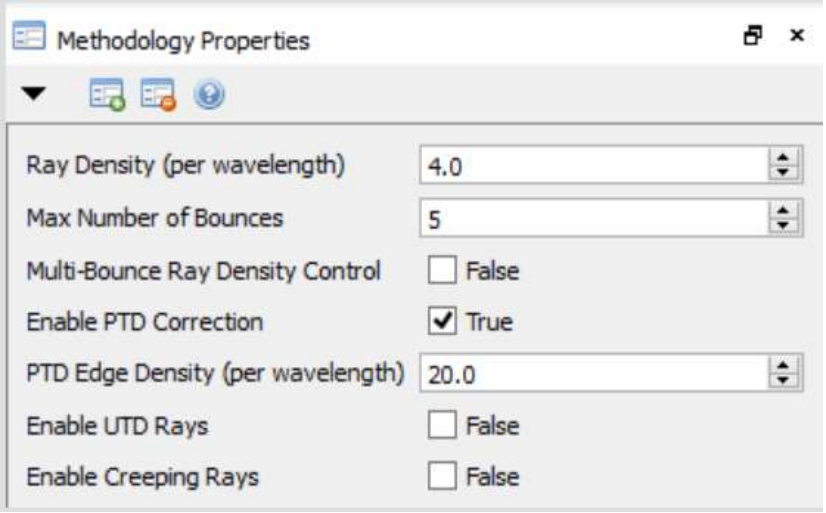


Рис. 11.21. Установка опций методологии

Убедитесь, что опция ***Enable PTD Correction*** включена, а опция ***Enable UTD Rays*** отключена. Т.о. мы выбираем метод геометрической теории дифракции. Запустите расчет. Он должен закончиться в несколько секунд.

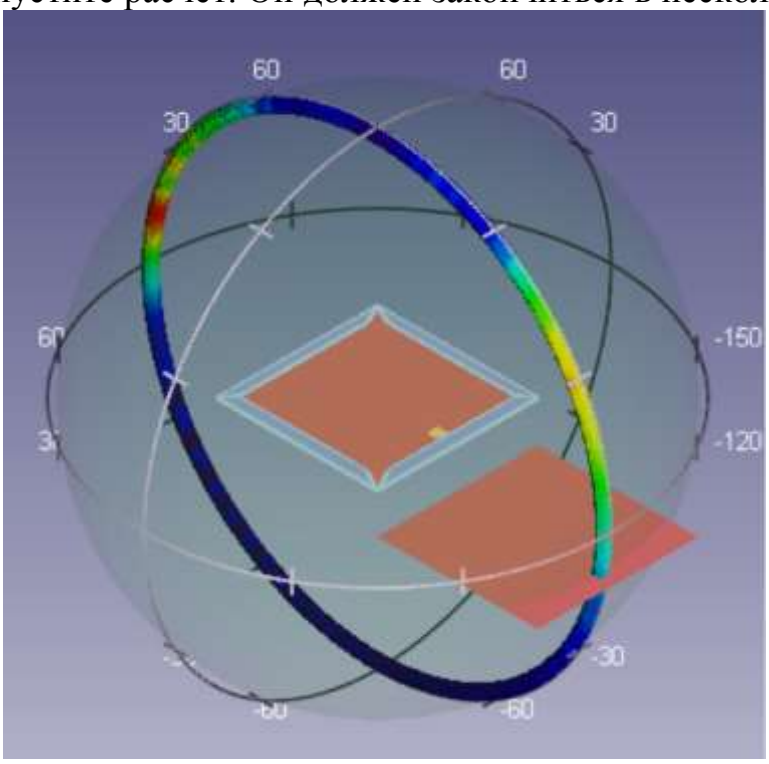


Рис. 11.22. Результаты расчета

Выберите узел ***Results*: *Far-Field***. Разверните панель **SBR Ray Statistics**. Эта папка показывает суммарную информацию о лучах ***SBR*** и ***UTD***

запущенных во время моделирования. Заметим, что число лучей дифракции на ребрах (***UTD***) равно 0, поскольку мы не включили свойства ***UTD***.

SBR Ray Statistics

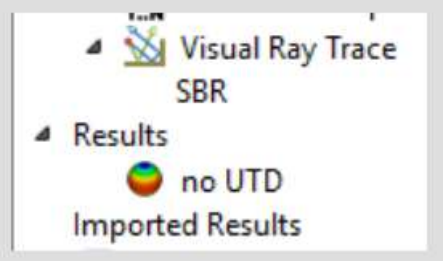
Num Launched = 8499
Num Launched (UTD) = 0
Num Blocked = 3682
Num Split = 0
Num Exceed Max Bnc = 0
Num Absorbed = 0
Num Escaped = 8499
Num Contributed = 8499

Reflection Depth	Num. Branches
1	8499
2	0
3	0
4	0
5	0

Transmission Depth	Num. Branches
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0

Рис. 11.23. Статистика лучей распространения

В панели свойств ***Far-Field***, кликните кнопку ***Keep Result***. ***Far-Field*** будет переименован на ***Kept Far-field 1***. В той же самой инструментарии, кликните кнопку ***Rename*** и измените имя узла на ***no UTD***.



Кликните правой кнопкой мыши по узлу ***no UTD*** и выберите ***Plot***.

Появляется график сечения диаграммы направленности в азимутальной плоскости в декартовой системе координат (рис. 11.24).

Новый узел ***Plot-Trace***, ***Total Composite-pol*** выбран в дереве проекта.

В панели свойств ***Total Composite-pol***, включите ***Custom Legend***. Введите ***no UTD*** как поясняющий текст (легенду) в поле ***Name***.

Разверните панель ***Rendering***. Установите ***Line Width*** = 2, установите ***Scale*** как ***Decibel***, *у*становите ***Polarization*** как ***Composite***.

Установите узел ***Plot***. Разверните папку ***Y-axis***. Установите ***Y-axis Range (dB)*** = 40 dB. Включите кнопку ***Lock Axes*** в окне ***Plot*** (рис. 11.24).

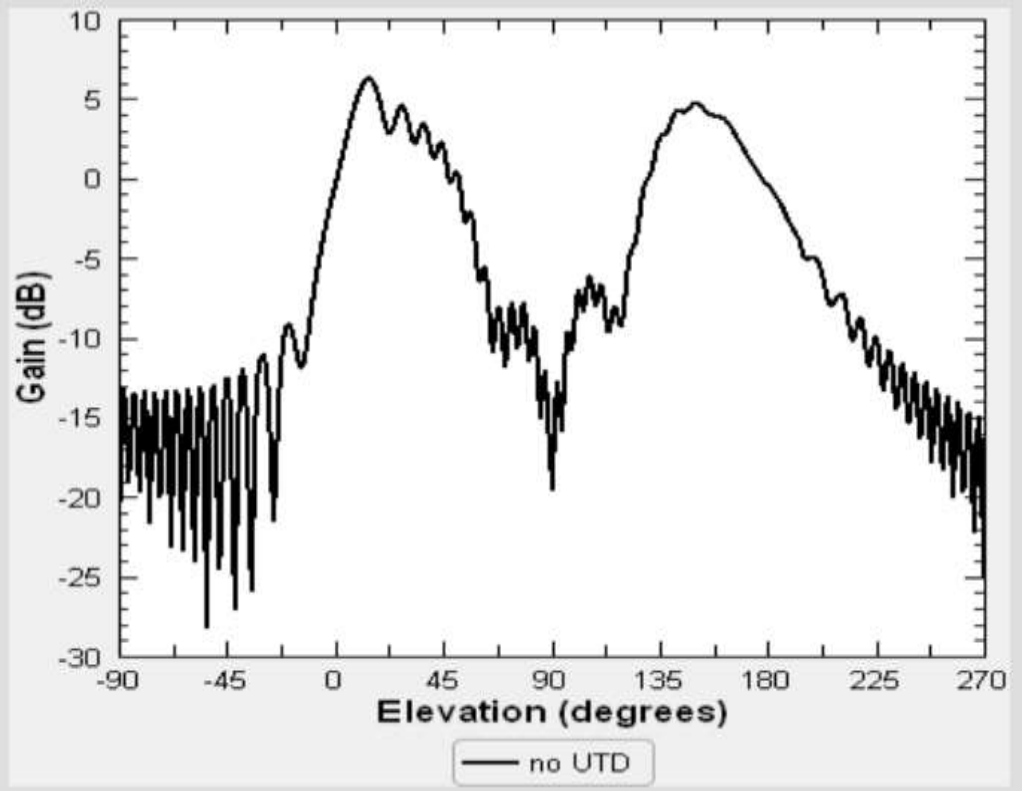
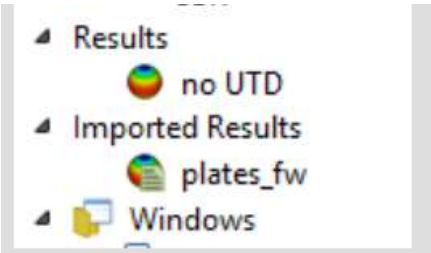


Рис. 11.24. Результаты расчета методом ГТД (no UTD)

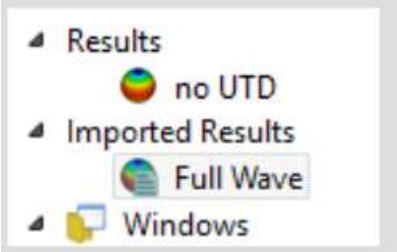
11.4.3 Сравнение результатов с полноволновым решением

Кликните правой кнопкой мыши на узел *Imported Results* и выберите ***Import Results from File...*** Загрузите файл результатов, ***Tutorial9/plates_fw.dlxcd***. Этот файл результатов был создан извне, используя метод моментов той же самой задачи. Он будет служить как идеальное решение.

Узел импортируемого результата ***plates_fw***, появляется в узле ***Imported Results.***



Кликните правой кнопкой мыши узел ***plates_fw*** и выберите ***Rename.*** Измените имя узла на ***Full Wave.***



Кликните и удерживайте на узле ***Full Wave*** без отпускания протащите его в окно **Cartesian plot** и затем отпустите кнопку мыши. Результат ***Full Wave*** добавится к графику, и новый узел характеристик, ***Total Composite-pol 2***, создастся и выберется под узлом ***Plot***.

В панели свойств ***Total Composite-pol 2***, включите ***Custom Legend*** и введите текст ***Full Wave***.

Разверните панель ***Rendering*** и установите ***Line Width*** = 2.

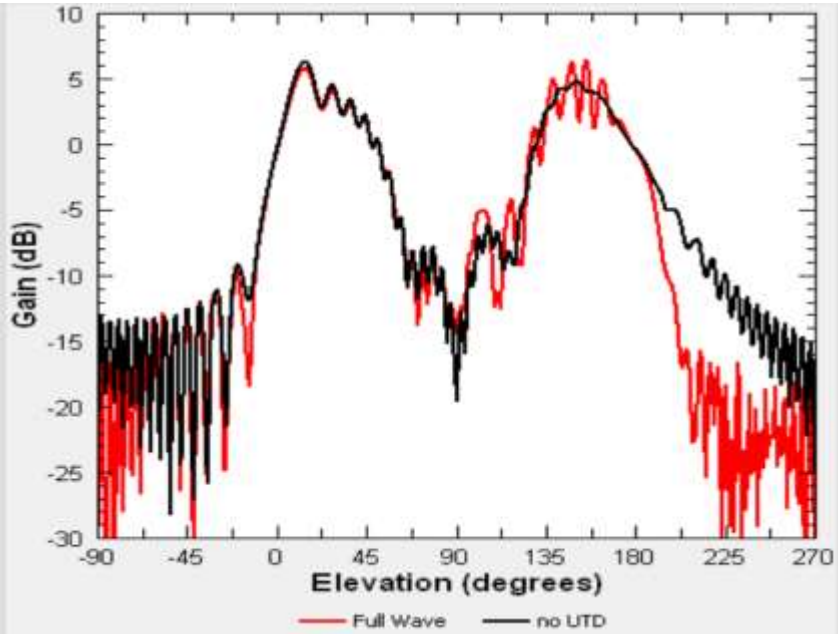


Рис 11. 25. Добавление результата расчета полноволновым ЭД методом

Сохраните проект.

11.5 Запуск моделирования с лучами *UTD*, и вывод результатов

Выберите узел ***Analysis:Methodology***. Включите опцию ***Enable UTD Rays*** (рис. 11.26).

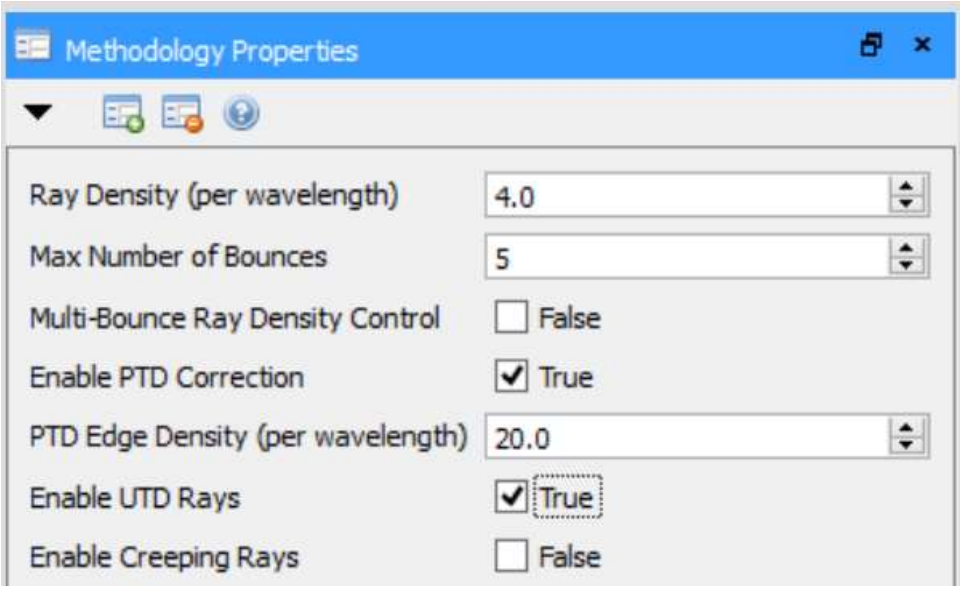


Рис. 11. 26. Добавление метода UTD

Savant теперь будет включать вклады в связи с дифракцией на ребре (***UTD***) лучей в моделировании. Переключатель ***Enable UTD Rays*** включен только в том случае, если на ребрах созданы клинья (автоматически/интерактивно созданный или импортированный из файла ****.wdg*** в проект).

Запустите моделирование. Моделирование закончится через несколько секунт и появится раскраска ДН (рис. 11.27).

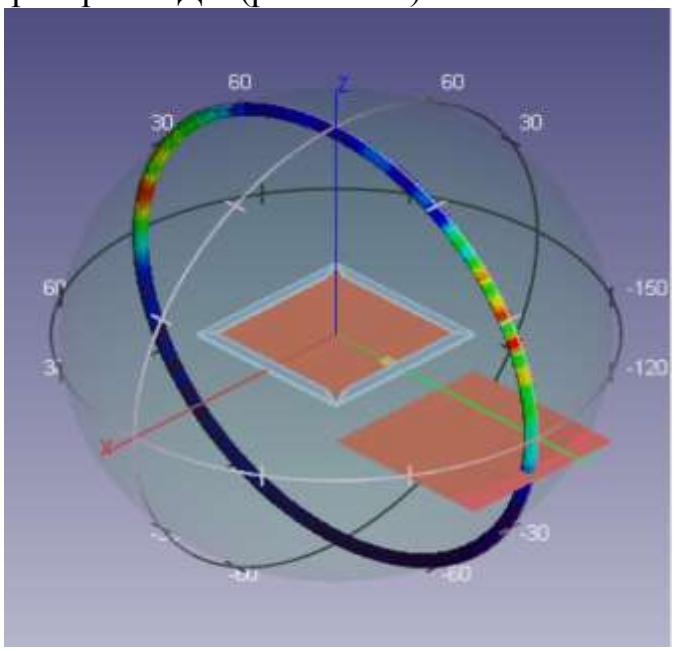
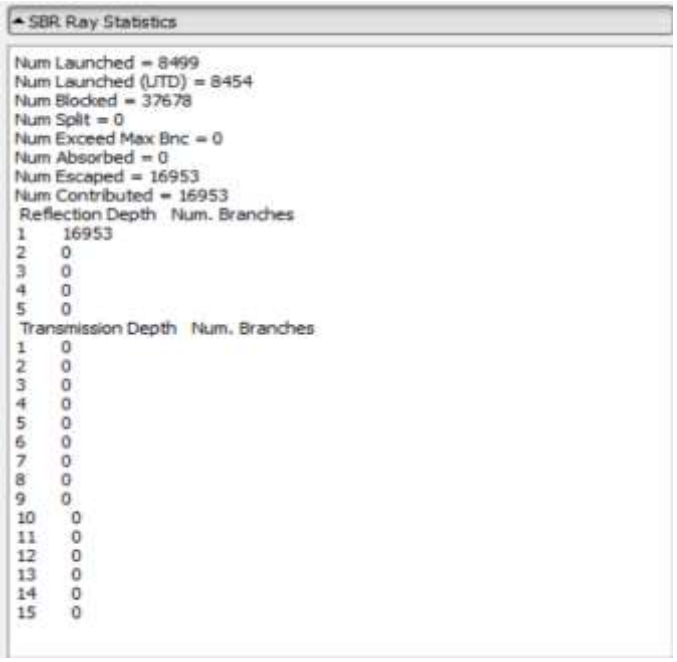


Рис. 11. 27. Вывод 3D диаграммы направленности излучения

Выберите узел ***Results*: *Far-Field***. Разверните папку ***SBR Ray Statistics***. Количество лучей дифракции на ребре (***UTD***) теперь становится большей частью из лучей, которые дают вклад в моделирование (рис. 11.28).



SBR Ray Statistics

Num Launched = 8499
Num Launched (UTD) = 8454
Num Blocked = 37678
Num Split = 0
Num Exceed Max Bnc = 0
Num Absorbed = 0
Num Escaped = 16953
Num Contributed = 16953

Reflection Depth	Num. Branches
1	16953
2	0
3	0
4	0
5	0

Transmission Depth	Num. Branches
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0

Рис. 11.28. Статистика лучей

Подтащите узел ***Far-Field result*** в график в прямоугольной системе координат, созданный ранее. В панели свойств для узла линии графика под именем ***Total Composite-pol 3***, включите ***Custom Legend*** и введите ***with UTD***, как текст.

Разверните папку ***Rendering*** и установите ***Line Width*** = 2.

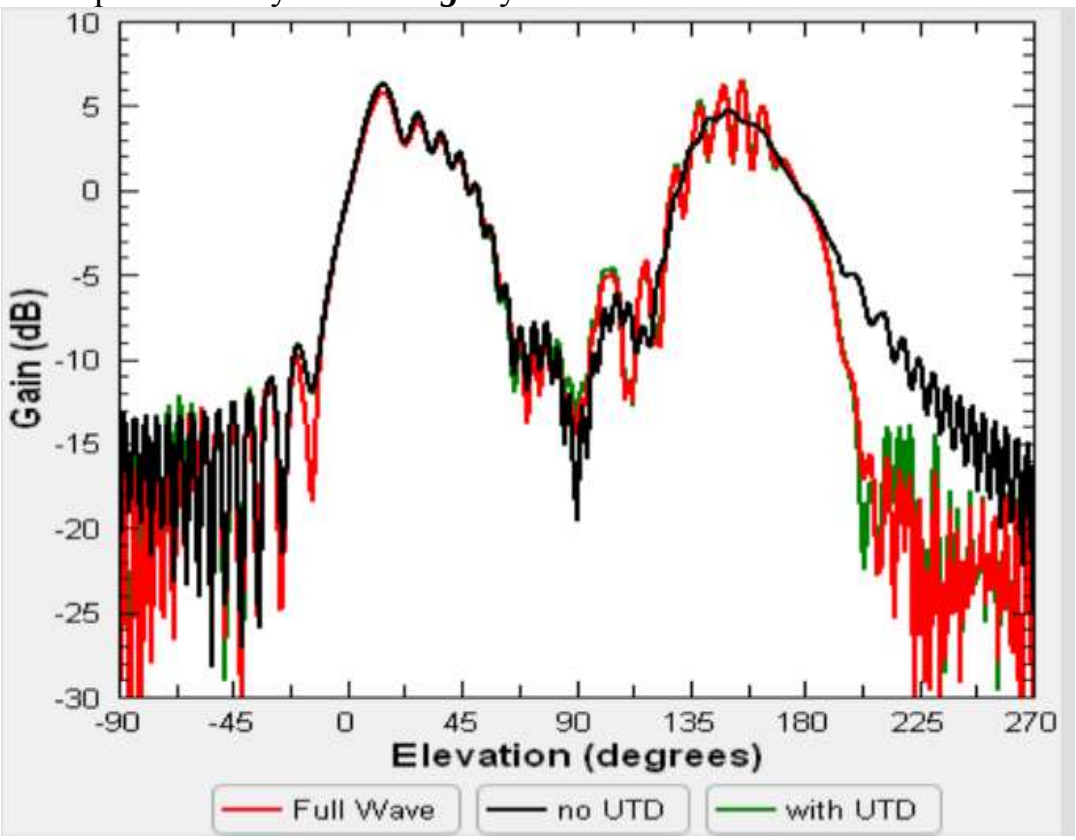


Рис. 11.29. Добавление результатов расчета полноволновым методом

Характеристика красным цветом (***Full Wave***) - это тестовое решение, относительного которого мы находим точность других результатов. Сравнивая с ней зеленую (с ***UTD***) и черную (без ***UTD***), видим значительное улучшение точности ДН когда имеются лучи ***UTD***, особенно между 90º и 270º. Вы можете увеличить этот интервал, чтобы увидеть улучшение более четко. Между 90º и 180º, ***Savant*** правильно предсказывает поля в структуре за счет интерференции между первых отраженных ***SBR*** лучей, которые отражаются от верхней плиты и лучей ***UTD***, которые отражаются от нижней пластины. Между 180º и 270º, наблюдается второй-отскок ***SBR*** лучей, падающих на нижнюю пластину. Лучи «по ***UTD»*** создают ожидаемый эффект усиления. Линия между передающей антенной и экранирующей пластиной закрывается верхней пластиной. Когда ***UTD*** лучи отключены, нижняя пластина не имеет никакого влияния на результаты, поскольку токи ***SBR*** лучей на возбуждаются на ней. Лучи ***UTD*** позволяют ***Savant*** учитывать влияние нижней пластины, и они в данном случае доминируют между 90º и 270º.

11.6 Визуализация лучей UTD

Закройте или минимизируйте окно графика. Выберите узел ***Visual Ray Trace***. Включите обе опции ***Shoot SBR Rays*** и ***Shoot UTD Rays*** (рис. 11.30). Дочерний узел ***SBR*** появляется под узлом ***Visual Ray Trace***.

Установите ***Max Frequency*** = 1 GHz. Из выплывающего меню ***Launch from***, выберите ***Transmitter***. Из выплывающего меню ***Launch from Tx drop-down menu***, выберите ***Phase Center***. Установите ***Launch from Tx Phase Center*** на 1.

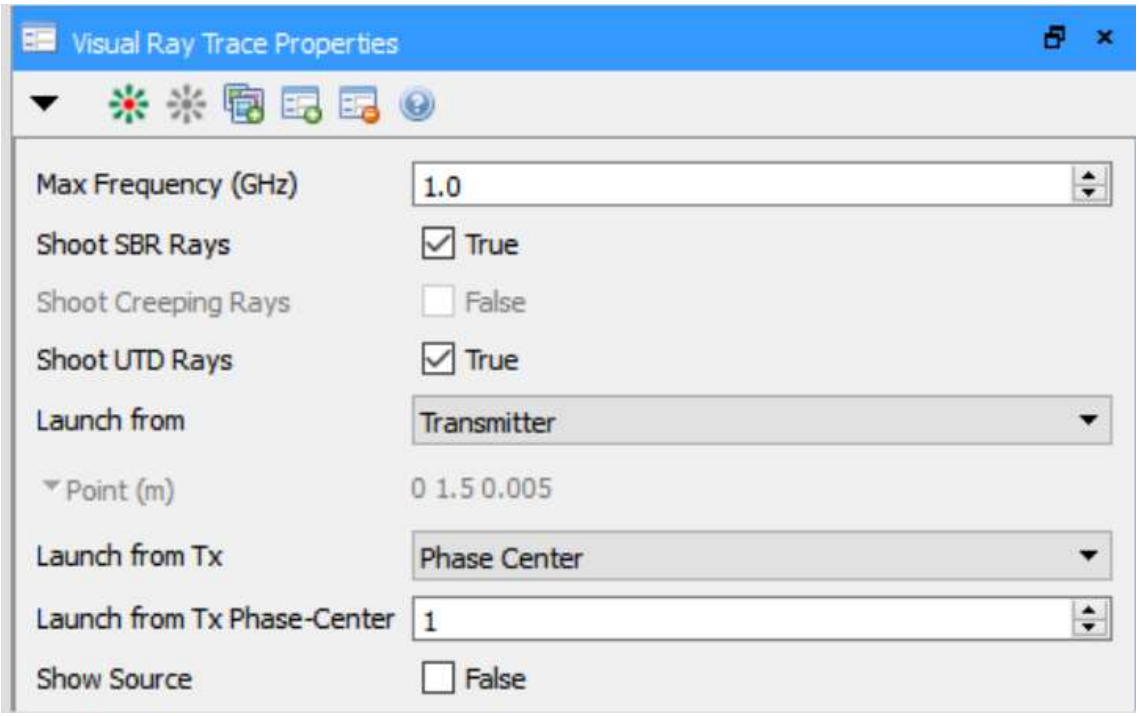
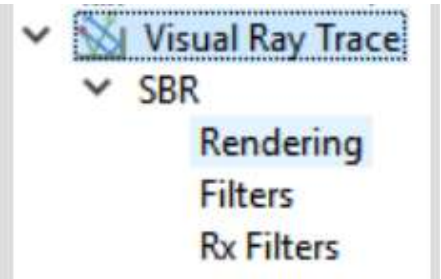


Рис. 11.30. Установки режима визуализации лучей UTD

Кликните кнопку ***Shoot Rays*** в главном меню. После выполнения ***ray-shoot*** три дочерние узла: ***Rendering***, ***Filters***, и ***Rx Filters,*** также появляются под узлом ***SBR***.



Для лучшего просмотра лучей, заблокируйте просмотр дальнего поля ***3-D far-field*** и отключите видимость ***Windows*: *3D - Scene*: *Far-Field*** узел ***render*** в столбце ***Visible*** в дереве проекта (рис. 11.31).

Разверните узел ***Antenna 1*** и выберите дочерний узел ***Current Sources***. В панели узла свойств, увеличьте размер источников тока приблизительно до 1.9, используя слайдер ***Length slider***

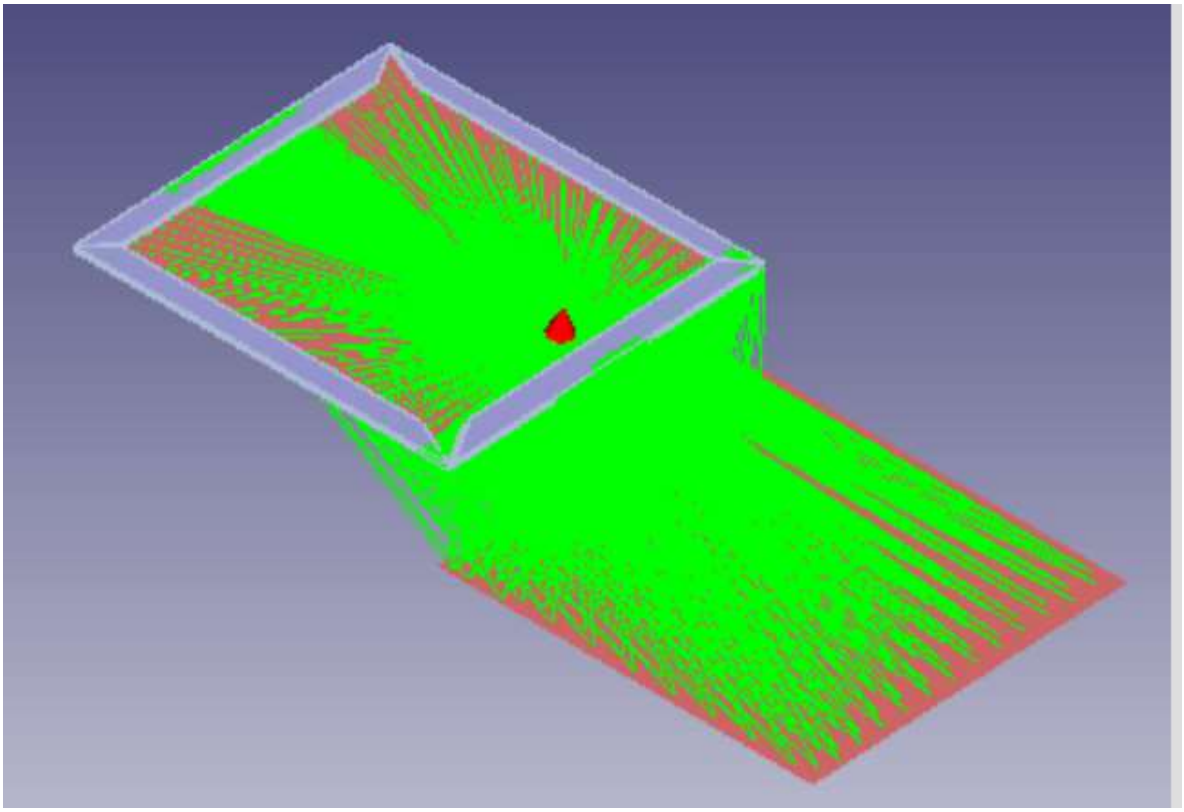


Рис. 11.31. Лучи рассчитываемые методом UTD

Выберите узел ***Visual Ray Trace*: *SBR: Rendering***. Закройте режим ***Draw as Lines*** и откройте ***Draw Ray Footprints***. Установите ***Footprint Line Width*** = 2.

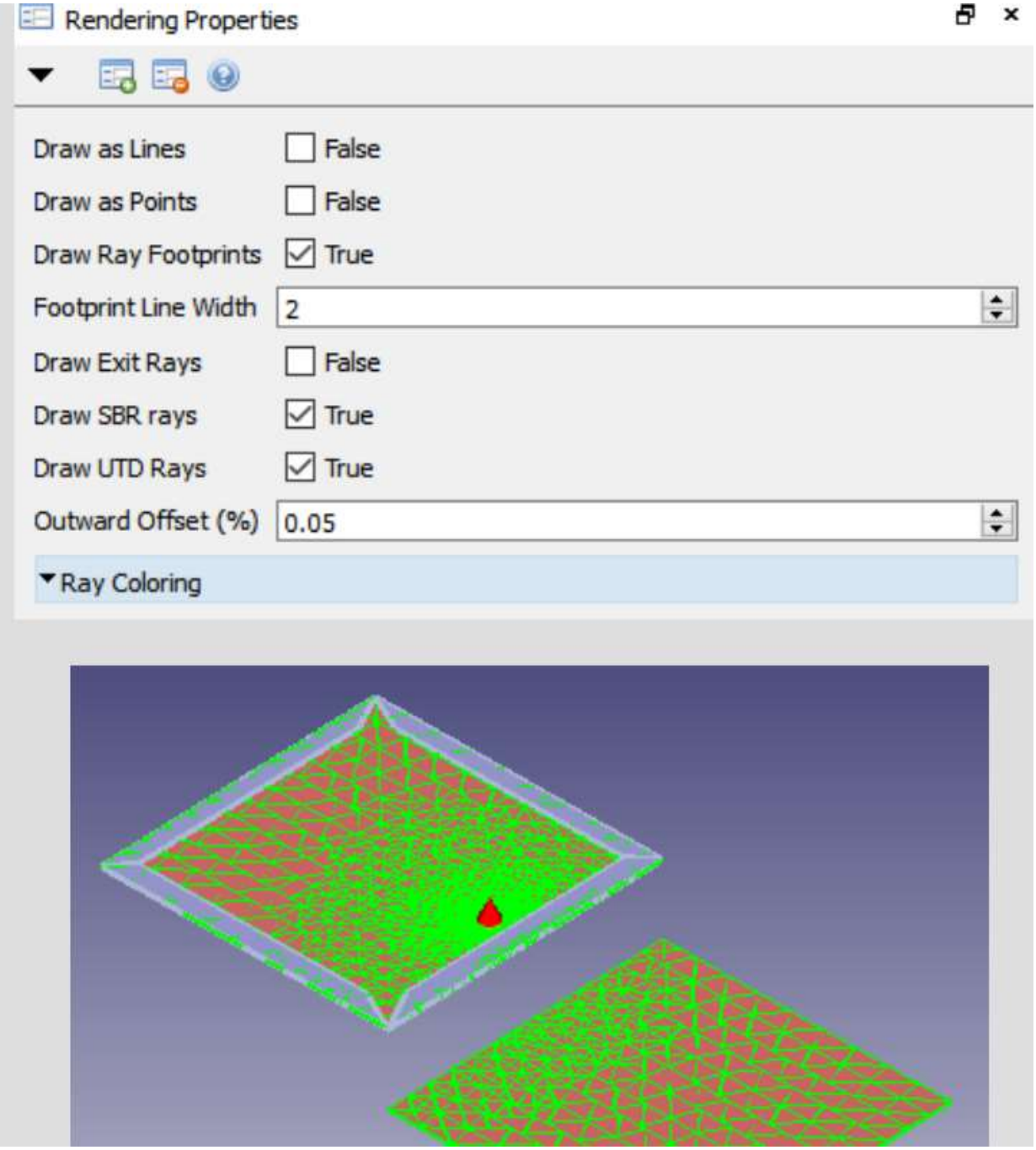


Рис. 11.32. Визуализация лучей в сетке разбиения пластин

Обе пластины полностью покрыты следами лучей. Вспомните наше предыдущее утверждение о том, что ***SBR*** токи на нижней пластине создаются лучи ***UTD***, которые излучаются от клиньев на верхней плите. Это можно проверить, отключив визуализацию следа луча ***UTD***.

В узле ***SBR: Rendering***, отключите ***Draw UTD Rays***. Это отключает отображение контуров, созданных лучами ***UTD***, и контуры на нижней панели исчезли.

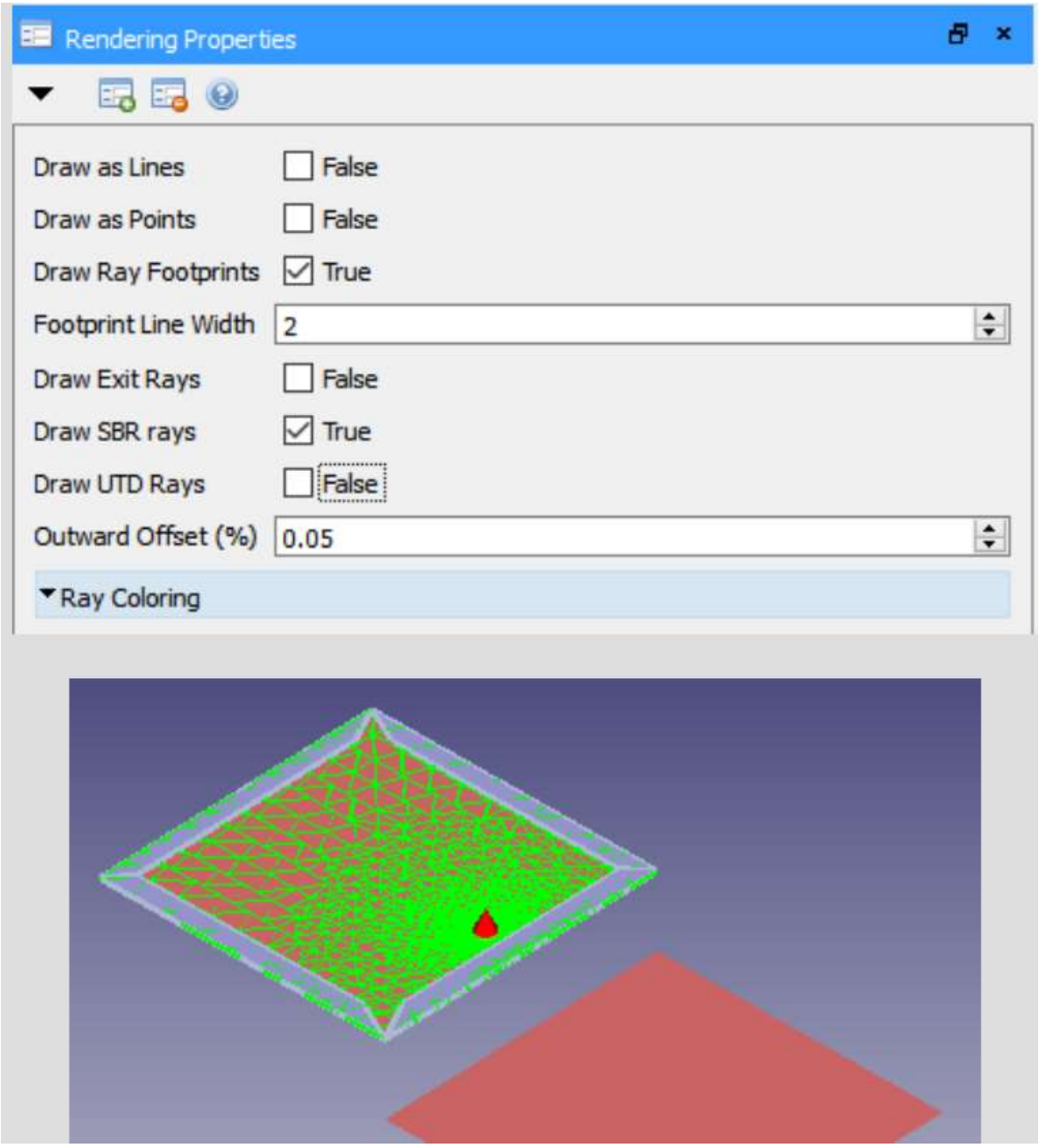


Рис. 11.33. Отключение лучей одной пластины

11.7 Исследование свойств лучей UTD на модели корабля

Теперь мы увидим влияние лучей ***UTD*** на реальной структуре. Этот пример продемонстрирует, что при правильных обстоятельствах включение лучей ***UTD*** может существенно улучшить покрытие лучей и точность расчета.

Кликните кнопку ***New Project*** в главном меню.

11.7.1 Импорт модели корабля, размещение монопольной антенны и выделение ребер модели

Импортируйте модель ***CAD Tutorial9/freighter_ship.facet***. Появится диалог, далее модель ***CAD***. Эта модель уже задана в метрах, так что кликните ***Cancel***.

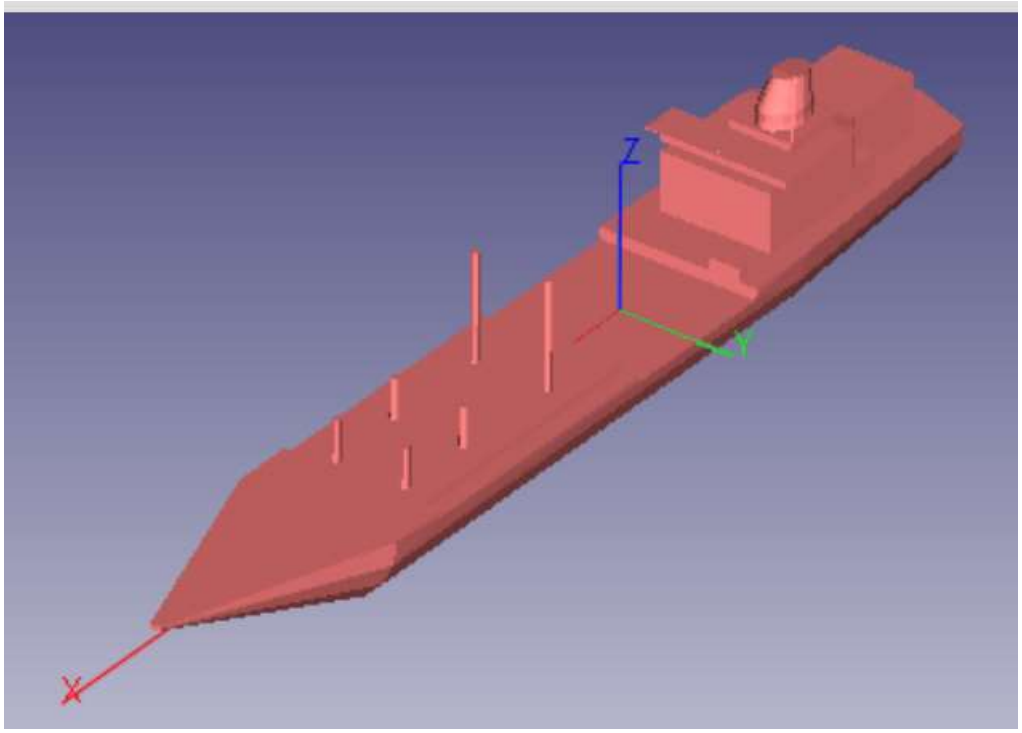


Рис. 11. 34. Модель корабля

Выберите узел ***freighter_ship CAD***. В панели свойств разверните папку *Rendering*. Из выплывающего меню ***Color by***, выберите ***Entire Model***. Отключите кнопку ***Display Axis*** в ***utility toolbar*** окна ***3D – Scene.***

Кликните кнопку ***Add Antenna*** в главном окне. Это создаст узел ***Antenna 1*** под узлом ***Scene***.Выберите узел ***Antenna 1***.

В панели свойств, установите ***Type*** как ***Wire Monopole***.

Установите ***Wire Length*** = 0.1 m.

Установите ***Antenna Representation*** как ***Current Sources***.

Установите ***Current Density Oversample*** = 1.0.

Убедитесь, что ***Place Object*** выбран на инструментальной линейке в окне ***3-D Window***.

Если бы поверхность была наклонена или изогнута, мы могли бы выбрать вместо этого ***Place Object Tangent to Surface***. Здесь это не нужно, потому что поверхность платформы горизонтальна. Увеличьте видимость грузового судна (рис. 11.35).

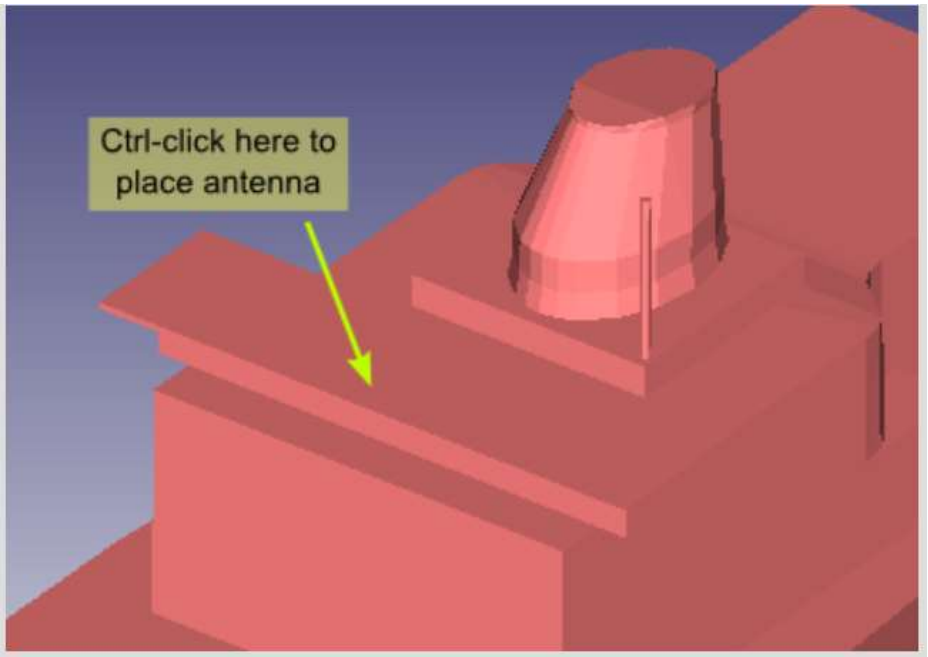


Рис. 11.35. Положение антенны на корпусе корабля

В окне ***3D – Scene*** расположите курсор мыши вблизи положения, показывающее стрелку в верхней диаграмме. Удерживайте клавишу ***Ctrl*** и кликните левой кнопкой мыши на место, где будет размещаться антенна.

В панели свойств для узле ***Antenna 1***, отключите ***Show Relative Coordinates***.

Разверните папку панели ***Position*** и введите

- *X*: -13.5
- *Y*: 0
- *Z*: 8.56

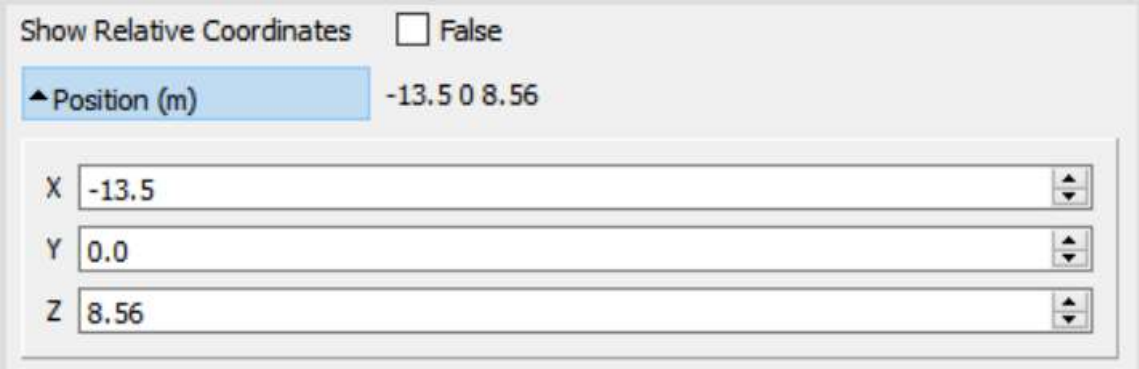


Рис. 11.36. Координаты положения антенны

Отключите ***Show Axes*** в панели узла свойств. Разверните узел ***Antenna 1*** и выберите дочерний узел ***Current Sources.*** В панели свойств увеличьте размер стрелок источников тока до величины около 1.26, используя слайдер ***Length***.

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***freighter_ship CAD*** и выберите ***Add Wedges***. Выберите новый узел ***freighter_ship-wedges***.

В панели свойств, включите команду ***Rebuild Edges***. Savant автоматически найдет ребра в модели и выделит серым цветом ребра (рис. 11.37). Установите ***Min. Interior Wedge Angle*** = 225°.

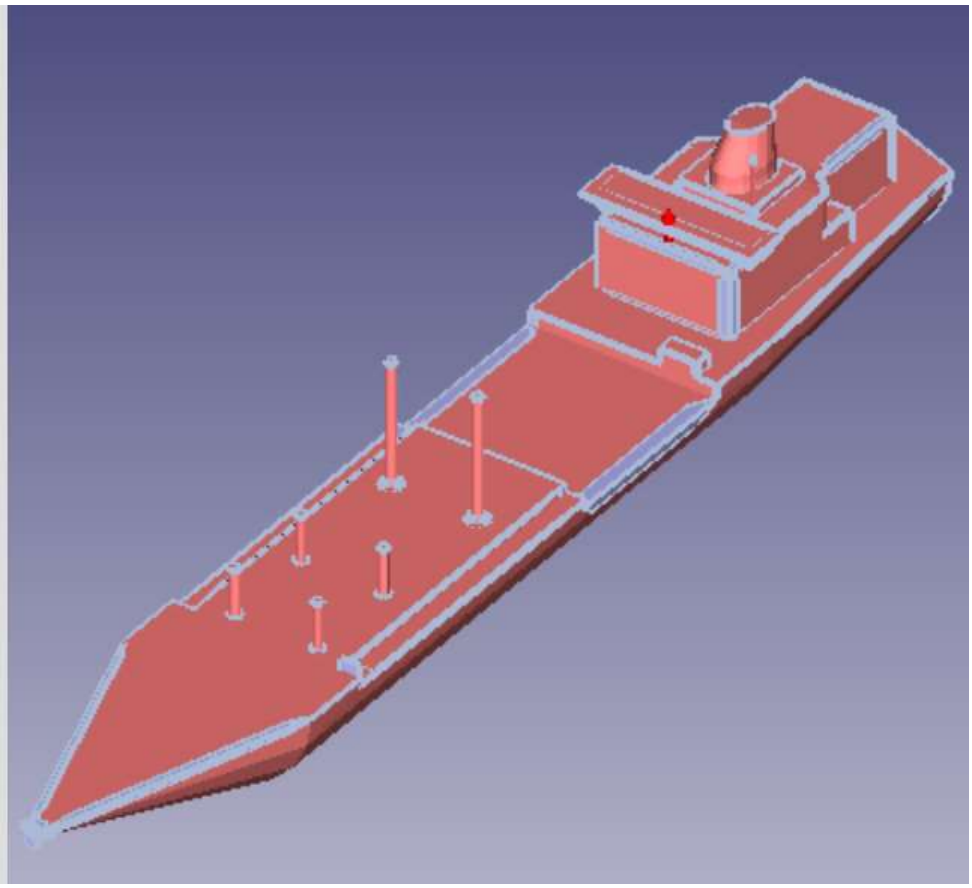


Рис. 11.37. Автоматическое нахождение ребер и создание клиньев

Отключите ***Rebuild Edges***.

Сохраните проект ***Tutorial9_ship.savant*** в директории ***Tutorial9***.

11.8 Задание параметров расчета без лучей UTD

Выберите узел ***Analysis***. Измените ***Analysis Type*** на ***Far-Field Pattern***.

Выберите ***Antenna 1*** для ***Tx Antenna***. Выберите узел ***Far-Field domain.*** Измените ***Far-field Type*** на ***Elevation Cut***. Сконфигурируйте ***Elevation Range*** следующим образом:

- ***Start*** = 0
- ***Stop*** = 360
- ***Number of Steps*** = 360

- Установите ***Fixed Azimuth*** = 0.

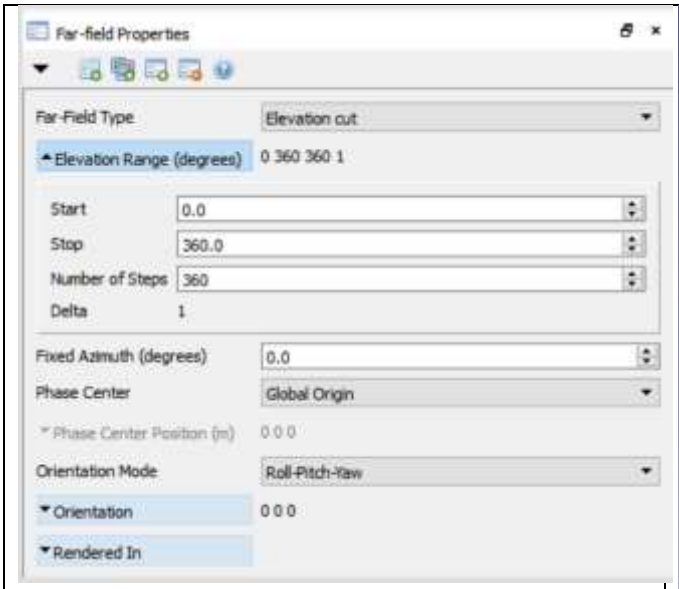


Рис. 11.38. Задание характеристик расчета дальнего поля

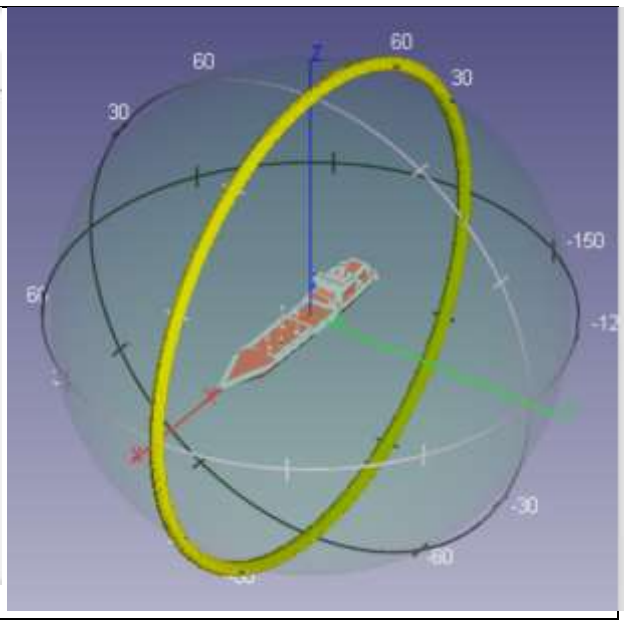


Рис. 11.39. Визуализация направления рассчитанного дальнего поля

Выберите узел ***Analysis:Frequency*** и выберите частоту ***Frequency*** = 1 GHz.

Выберите узел ***Methodology*** и установите его свойства как на рис. 11. 40.

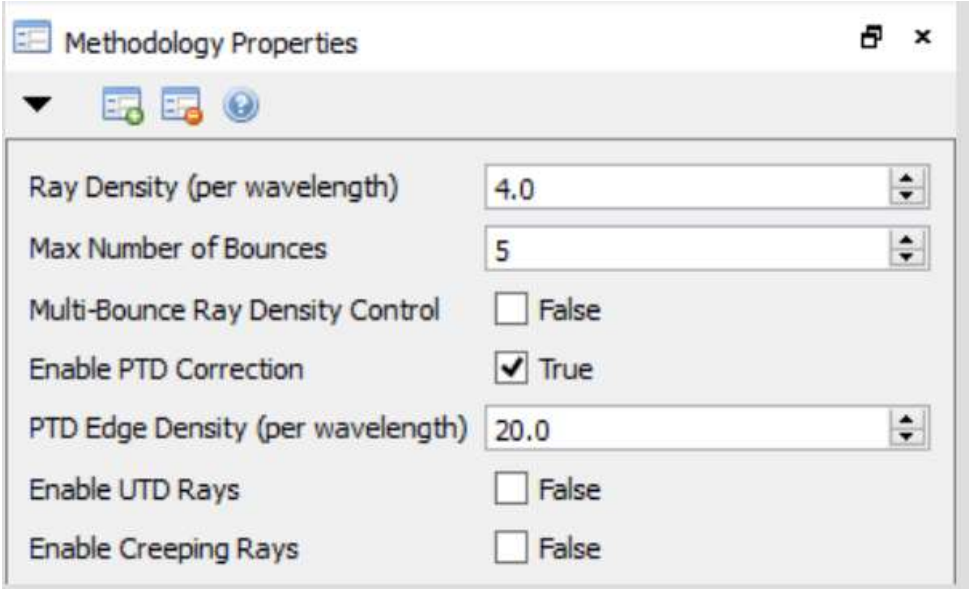


Рис. 11.40. Свойства метода расчета

Убедитесь, что включен режим ***Enable PTD Correction***, а опция ***Enable UTD Rays*** отключена. Это означает, что будет реализован метод геометрической дифракции. Запустите расчет. Он выполнится за несколько секунд (рис. 11.41).

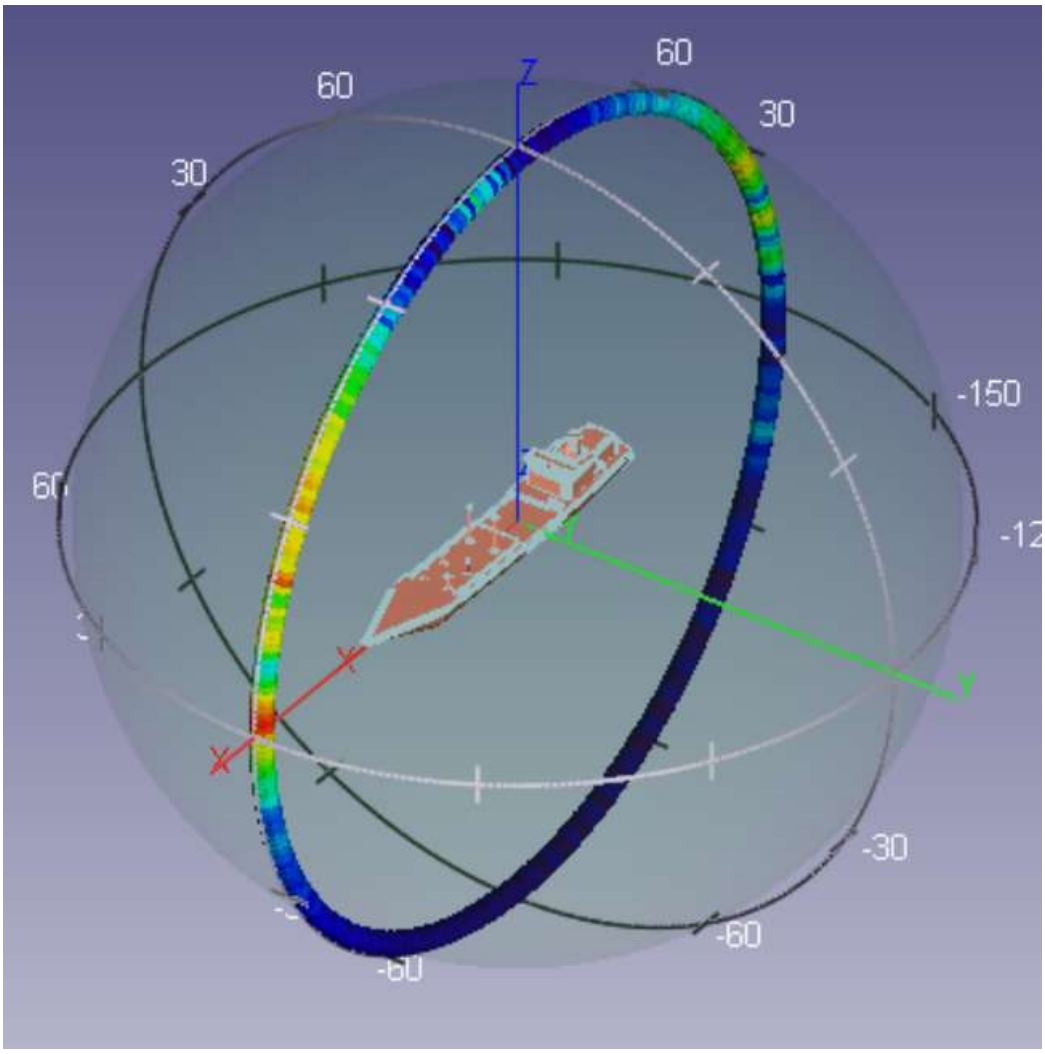


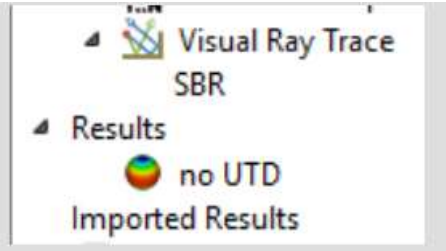
Рис. 11.41. Рассчитанные поля дальнего поля антенны на платформе корабля

11.9 Запуск расчета с включенными лучами *UTD*.

Перед повторением моделирования с лучами UTD, нам нужно сохранить результаты ***no-UTD*** которые были получены. Иначе они будет удалены и заменены результатами в следующем моделировании.

Выберите узел ***Results*: *Far-Field***. В инструментальной линейке сверху панели свойств ***Far-Field***, кликните кнопку ***Keep Result***.

Переименуйте ***Far-Field*** на ***Kept Far-field 1***, для чего кликните кнопку ***Rename*** и измените имя узла на ***no UTD.***



Сохраните проект.

Выберите узел ***Analysis:Methodology***. Включите опцию ***Enable UTD Rays*** (рис. 11.44)

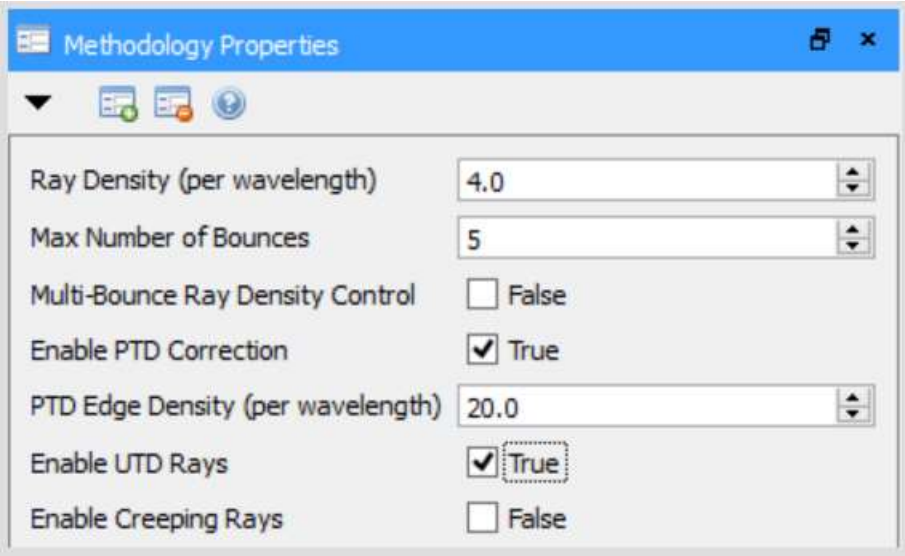


Рис. 11.44. Выбор методологии расчета

Запустите моделирование. Моделирование займет больше времени из-за большого количества дополнительных лучей, генерируемых функцией ***UTD***, но оно все равно должна завершиться в течение двух минут.

11.9.1 Сравнение результатов с и без лучей *UTD*

Кликните правой кнопкой мыши узел ***no UTD*** и выберите ***Polar Plot***. Новый график с полярной системой координат появляется с результатами расчета. Новый узел ***Plot-Trace, Total Composite-pol*** выбран в дереве проекта.

В панели свойств ***Total Composite-pol***, включите ***Custom Legend*** и введите ***no UTD***, как текст легенды.

Разверните папку ***Rendering*** и установите ***Line Width*** = 2. Установите ***Scale*** на ***Decibel***. Установите ***Polarization*** на ***Composite***.

Выберите узел ***Polar Plot***. Разверните папку ***Radial-Axis*** и установите ***Radial Range (dB)*** = 45 dB.

В боксе ***Title*** введите ***Pitch Plane*** *(Az=0^0)*.

Включите ***Display CAD Overlay***. Нажмите кнопку ***Lock Axes*** в окне ***Polar Plot***.

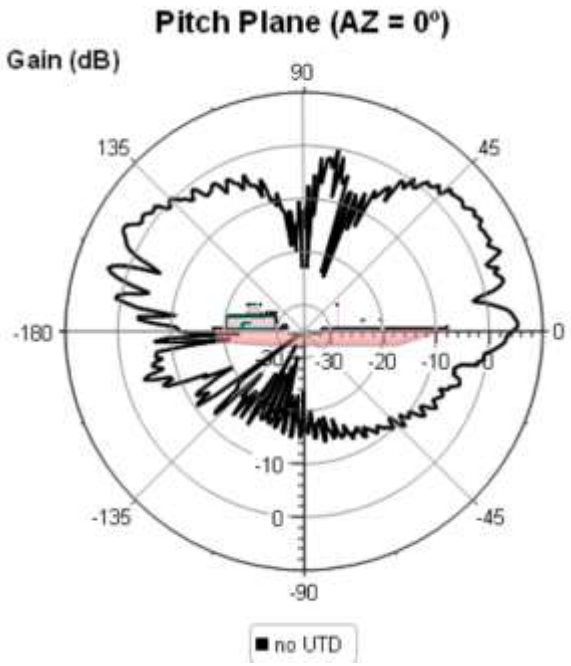


Рис. 11.45. Сечение ДН

Перетащите узел результатов ***Far-Field*** в график в полярной системе координат, созданный на предыдущем шаге.

На панели свойств для участка трассировки с именем ***Total Composite-pol 2***, включите ***Custom Legend*** и введите ***UTD***, как текст легенды.

Разверните папку панели ***Rendering*** и установите ***Line Width*** = 2.

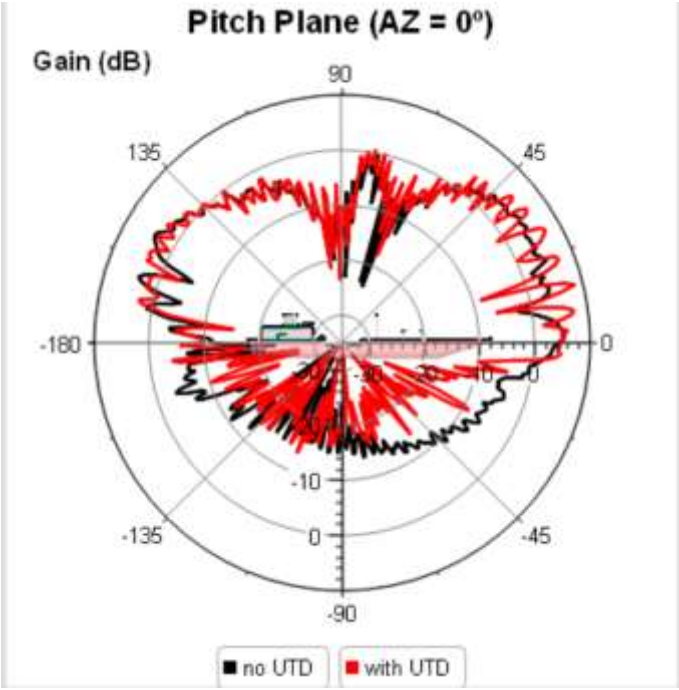


Рис. 11.46. Характеристики дальнего поля с учетом UTD и без учета UTD

Существует два важных различия между этими двумя ДН. С включением ***UTD*** лучей, есть рябь между 0º и ~50º. Как и в более простом случае плоскости ***PEC*** на шаге 1-4, эти пульсации являются результатом

интерференции между ***SBR*** лучами, отражаясь от платформы, на которой размещается антенна и ***UTD*** лучи отражались от палубы корабля. Эти ***UTD*** лучи отражаются от края платформы, антенны и других нижних частей корабля. Без лучей ***UTD***, эти лучи, направленные вниз, полностью поглотила бы платформа. Это будет более четко видно в визуальном следе луча на следующем шаге. Другое важное отличие двух моделей - это эффект затенения, созданный ***UTD*** лучами между ~ -60º и 0º. ***UTD*** лучи вызывают ***SBR*** токи, изображенные на палубе корабля, что, в свою очередь, вызывают эффект затенение, когда их излученного поля деструктивно интерферирует с падающим полем от провода монопольной антенны.

11.9.2 Просмотр лучей *UTD*

Закройте или минимизируйте графическое окно

Выберите узел ***Visual Ray Trace***. Включите обе опции ***Shoot SBR Rays*** и ***Shoot UTD Rays***.

Установите ***Max Frequency*** на 1 GHz. Из выплывающего меню ***Launch from*** выберите ***Transmitter***. Из выплывающего меню ***Launch from Tx*** выберите ***Phase Center***. Установите ***Launch from Tx Phase-Center*** на значение 1.

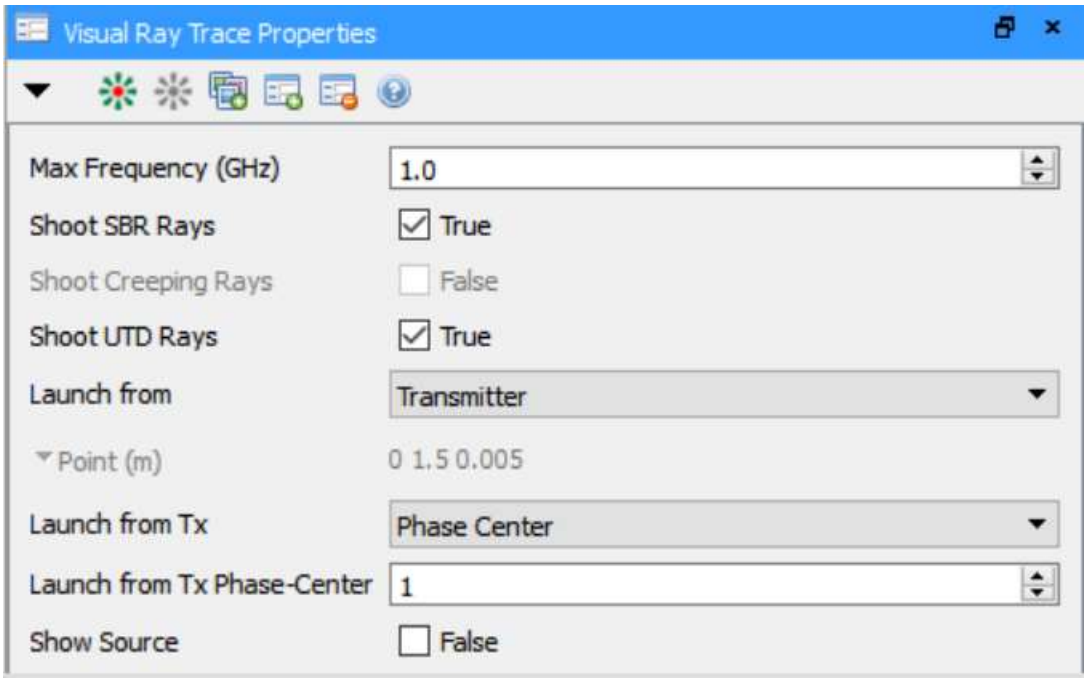


Рис. 11.47. Характеристики визуализации лучей

Кликните кнопку ***Shoot Rays*** в главном меню. Для лучшего просмотра лучей, заблокируйте ***3-D far-field*** отключением видимости ***Windows*: *3D - Scene*: *Far-Field*** в столбце ***Visible*** дерева проекта (рис. 11.48).

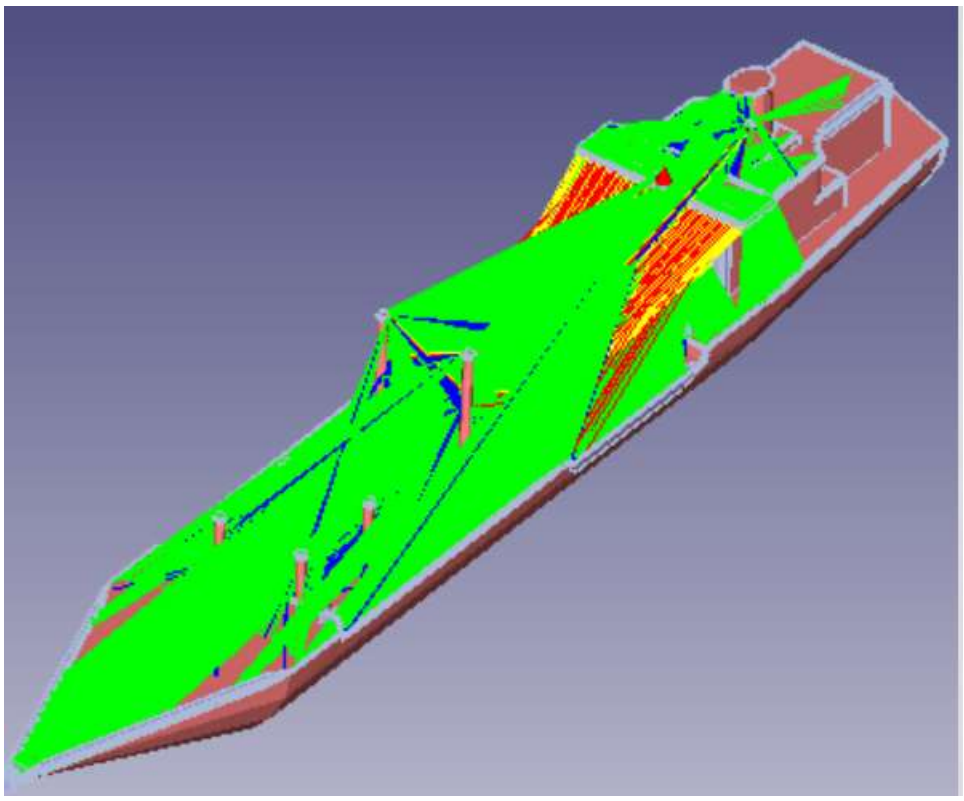


Рис. 11.48. Лучи, излучающие антенной на корпусе корабля

Выберите узел ***Visual Ray Trace*: *SBR: Rendering***.

Заблокируйте опцию ***Draw as Lines*** и активизируйте ***Draw Ray Footprints*** (рис. 11.49).

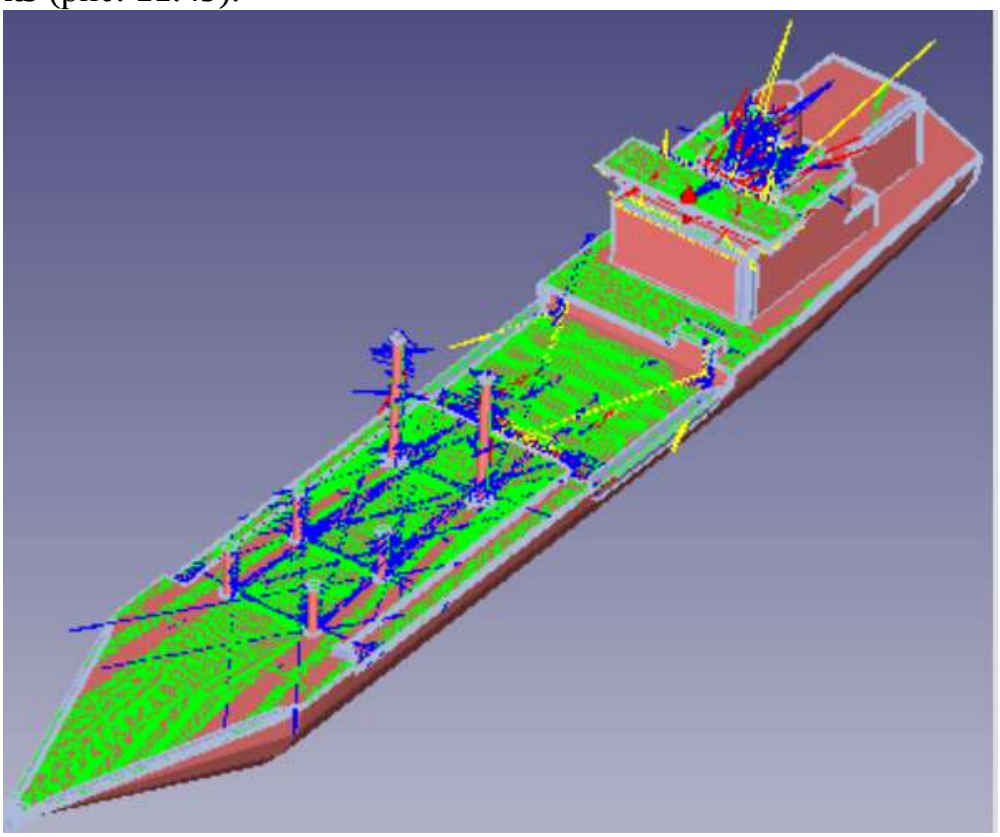


Рис. 11.49. Лучи на поверхности корабля

Теперь мы отфильтруем некоторые лучи, чтобы уменьшить беспорядок на снимке.

Выберите узел ***SBR: Filters***. Включите ***By Bounce #*** и введите следующие числа для границ индексов границ:

- ***Minimum Bounces***: 0
- ***Maximum Bounces***: 2

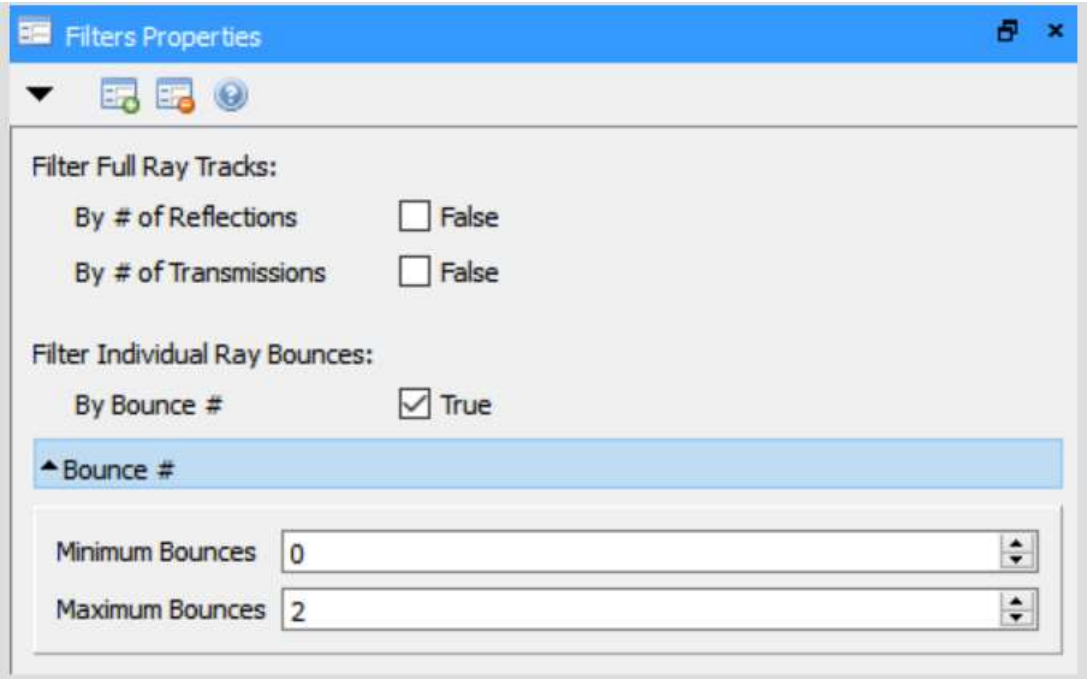


Рис. 11. 48. Изменение характеристик выводимых лучей

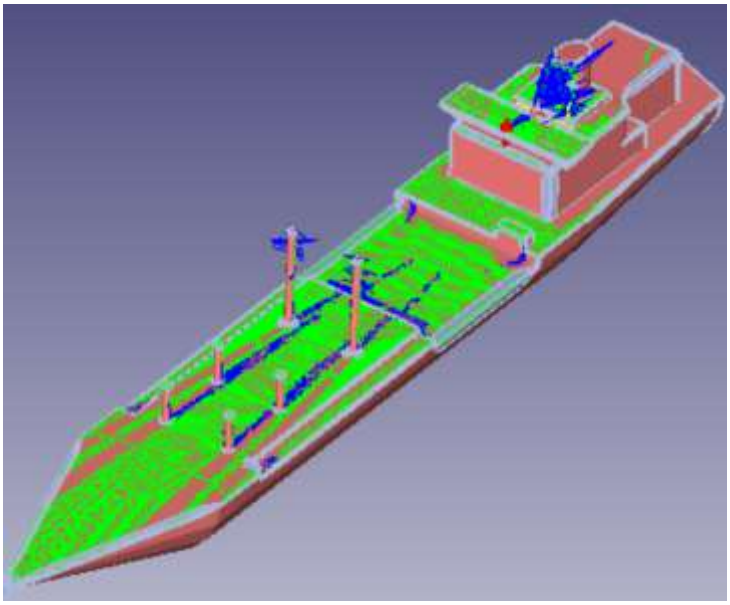


Рис. 11.49. Вид лучей с учетом изменения характеристик вывода

Отметим, что почти вся палуба корабля покрыта следами, хотя они и не находятся в прямой видимости передатчика. Это стало возможным благодаря дифракции ***UTD*** лучей от краев платформы. Мы можем легко проверить это,

отключив рендеринг лучей ***UTD***. В узле ***SBR:*** ***<u>Rendering</u>*** отключите ***Draw UTD Rays***.

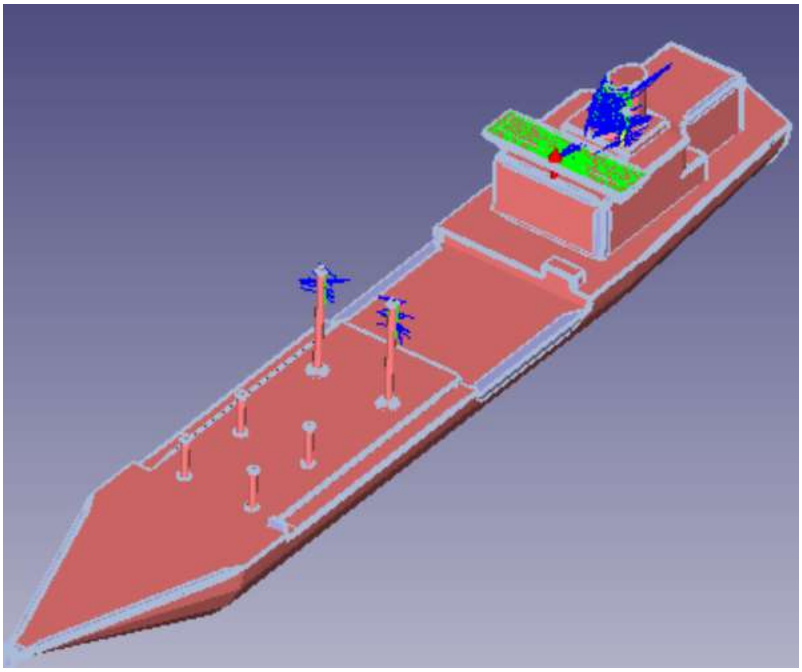


Рис. 11.50. Отключение лучей, рассчитанных методом UTD

Только антенная платформа (рис. 11.50) излучает непосредственно лучи ***SBR***. Следы на палубе исчезли, поскольку они были созданы лучами ***UTD***.

Включите ***Draw UTD Rays***. Увеличьте область с шестью цилиндрическими мачтами на палубе корабля (рис. 11.51).

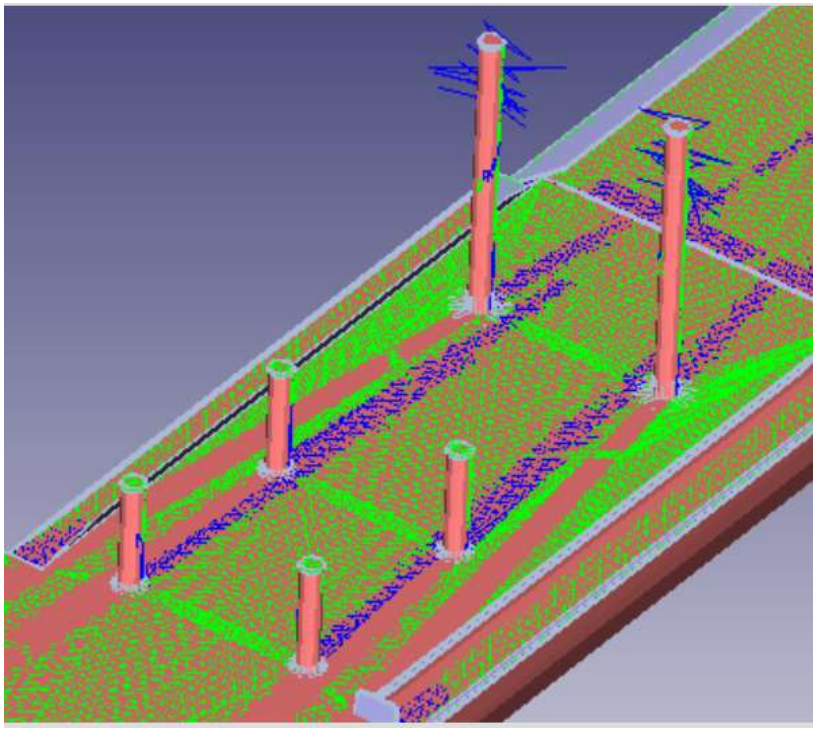


Рис. 11.51. Сортировка лучей, падающих на палубу корабля

После дифракции от края, луч ***UTD*** ведет себя точно так же, как расчет в любом методе ***SBR Ray***. Он может отражаться и передаваться через поверхности, или уйти на бесконечность.

Хороший пример такого поведения показан на рис. 11.51, где следы лучей на палубе отображаются разными цветами. По умолчанию следы лучей окрашиваются по отношению к числу отражений, которые луч подвергается перед уходом в бесконечность. Можно проверить или изменить схему раскрашивания, развернув папку окраски луча в узле ***SBR: Rendering***. На изображении рис. 11.51 следы лучей, которые отражаются один раз перед уходом в бесконечность, окрашены в зеленый цвет, в то время как следы для лучей, которые отражаются дважды, окрашены в синий цвет. Зеленые зоны на палубе представляют лучи, которые:

1. Претерпевают дифракцию на ребре антенной платформы.
2. Отражаются от палубы корабля.
3. Исчезают в бесконечности.

Тонкие голубые полоски которые начинаются от ребер каждой мачты и продлеваются к передатчику, представляют лучи, которые:

1. Создают дифракцию хотя бы от одного ребра платформы антенны.
2. Отражаются от поверхности одной из мачт.
3. Отражаются снова от палубы корабля.
4. Исчезают в бесконечности.

Тени за каждой мачтой представляют собой области, которые не освещены никаким лучом. Точнее, любой луч, который отразился от 0 до 2 раз, так как мы применили фильтр отражений визуальной трассировки луча ***Visual Ray Trace***.

12 ИМПОРТ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕННЫ

Этот пример разделен на две части. В первой части выполняется экспорт щелевой антенны с резонансной полостью, созданной в ***ANSYS Electronics 18.0*** с помощью инструмента ***HFSS-Savant Datalink Toolkit***.

Экспортированная модель щелевой антенны затем загружается в ***Savant***, включая рассчитанные значения плотности поля на небольшом боксе, включающем пространство над щелью. Далее генерируются эквивалентные источники тока антенны с помощью автоматической функции. Антенна после этого помещается в воздушный бокс и рассчитывается излучение в дальнюю зону установленной щелевой антенны.

Во второй части примера, та же антенна вставляется в боковую часть цилиндра, и изменением высоты щель согласуется с кривизной цилиндра.

Итак, выполним:

- Экспорт модели проекта антенны из ***ANSYS Electronics Desktop*** и импорт её в ***Savant.***
- Создание эквивалентного источника тока для этой антенны.
- Установку антенны на искривленную поверхность.

Пример состоит из следующих шагов:

1. Загрузка проекта ***ANSYS Electronics Desktop***, запуск на анализ и экспорт результатов в **Savant.**
2. Загрузка экспортированной антенны в ***Savant.***
3. Генерирование источников тока для антенны.
4. Вставка щелевой антенны в боксе в стабилизатор самолета ***B-737.***
5. Расчет ДН антенны на самолете для двух сечений.
6. Создание нового проекта ***Savant*** и включение щелевой антенны на сторону цилиндра (рис. 12.1).
7. Согласование плоской щели и искривленного цилиндра.
8. Расчет ДН, используя опцию ползущих волн.

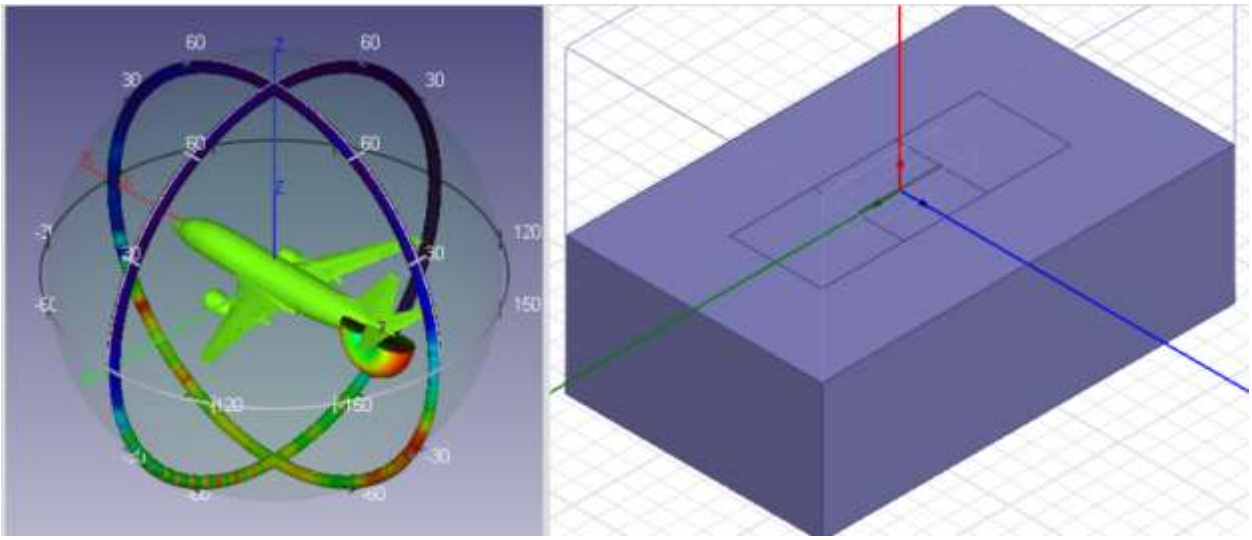


Рис. 12.1. Самолет, в хвосте которого устанавливается щелевая антенна

Для выполнения всех шагов в этом примере требуется комплекс ***ANSYS Electronics Desktop 18.0*** вместе с инструментом ***HFSS-Savant Datalink***. Инструмент ***HFSS-Savant Datalink*** устанавливается с ***ANSYS Electronics Desktop R18.0***.

Запустите ***ANSYS Electronics 18.0 (AEDT)***. Откройте архивный проект ***AEDT***, ***Tutorial10/CavityBackedSlot_4GHz.aedtz***.

Сразу после открытия архива ***AEDT***, появится диалог ***Project File Restore Location***. Командой ***Save in*** сохраните проект с именем ***CavityBackedSlot_LP*** в папке ***Tutorial10***. Появится диалог ***Restore Archive***. Закройте его.

Выберите вновь загруженный проект ***CavityBackedSlot_LP*** из менеджера проекта ***Project Manager***. Кликните в меню *View* в главном меню, сдвиньте указатель мыши на ***Visibility***, и выберите ***Active View Visibility...***. Появится диалог ***Active View Visibility***. Если вы не можете найти под-меню ***Visibility*** под верхним на верхнем уровне меню ***View***, попробуйте вначале выбрать (нажать) ***Solids*** в дереве модели находящейся в панели справа от дерева ***Project Manager*** и затем перейдите назад в меню ***View***.

Переключите видимость (***Visibility***) для всех объектов, которые появились в таблице ***3D Modeler***: ***Cylinder***, ***Cavity***, ***Cap***, ***Excitation***, ***BoundingBox*** и ***NFBox***.

Закройте диалог ***Active View Visibility*** нажимая ***Done***. Из меню ***View***, выберите ***Grid Settings...***. В диалоге выплывшего диалога ***Grid Spacing***, установите ***Grid visibility*** на ***Show***. Кликните ***OK*** для закрытия диалога ***Grid Spacing***.

Окно 3-D визуализации покажет конфигурацию для пробника питания, щели в корпусе, спроектированного для работы на частоте 4 ГГц. Эта щель имеет размеры 38 мм x 1.9 мм (рис. 12.2).

В дереве модели под ***Model/Solids/vacuum***, имеется элемент, обозначенный ***NFBox*** *(бокс ближнего поля)*. Этот элемент не влияет на моделирование. Это бокс, выбирающий поле, и используется инструментом

HFSS-Savant Datalink для экспорта данных ближнего поля, который нужен для ***Savant***.

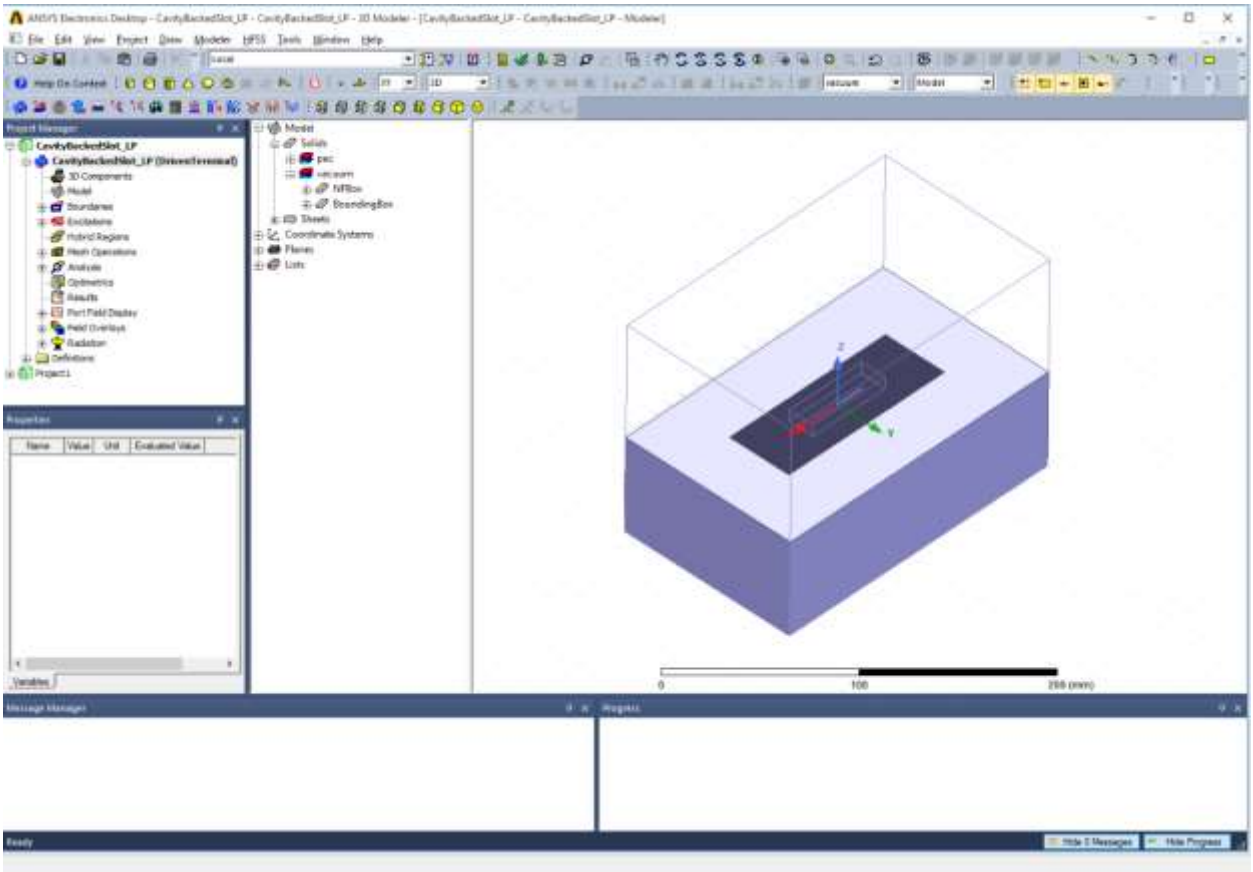


Рис. 12.2. Бокс ближнего поля ***NFBox***, созданный в программе ***HFSS***

Кликните кнопку ***Analyze All*** в инструментальной линейке ***HFSS AEDT***. Это запустит моделирование в ***HFSS***; мы должны получить результаты перед тем, как экспортировать их в ***Savant*** (рис. 12.3).

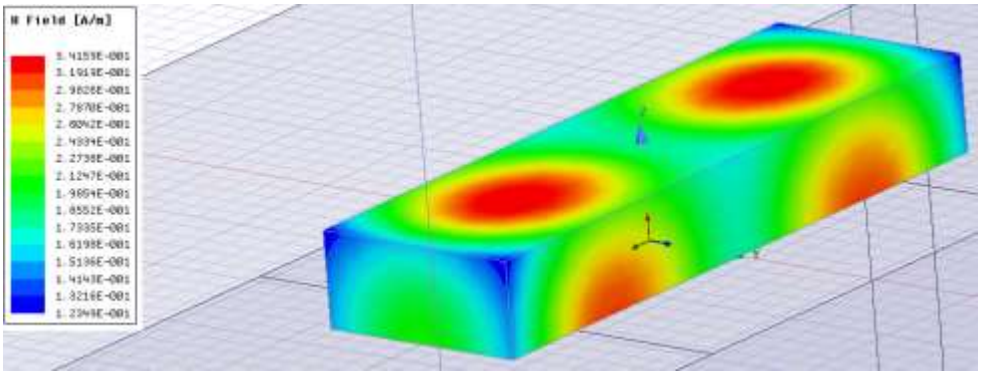


Рис. 12.3. Вид ближнего поля H на поверхности блока **NFBox**

Теперь будем монтировать этот блок на корпусе самолета.

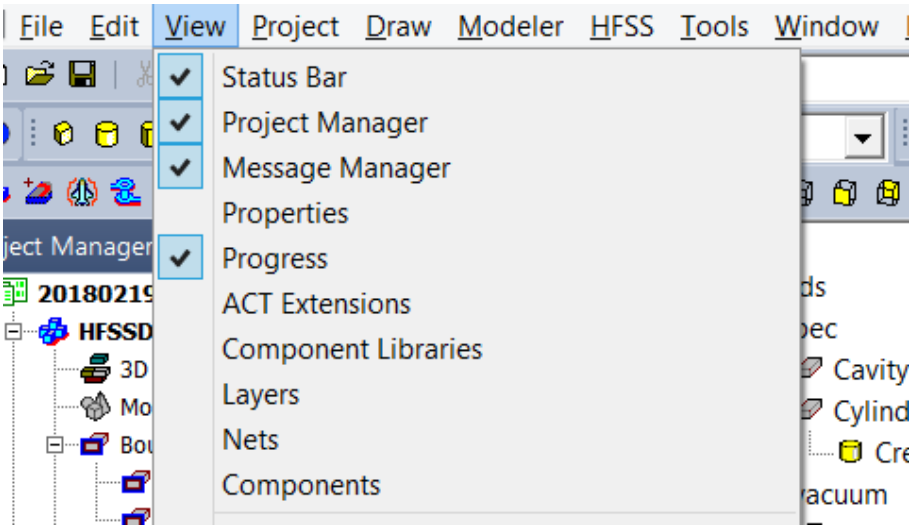


Рис. 12. 4. Меню ***View***, в котором находится команда включения подпрограмма ***HFSS ANSYS***

После окончания расчета в HFSS сохраните проект, откройте меню ***View*** и выберите расширения ***ACT Extensions*** (рис. 12.4). Это откроет новое окно с инструментом ***ACT Extensions*** для запуска программы ***HFSS-Savant Datalink*** (рис. 12.5).

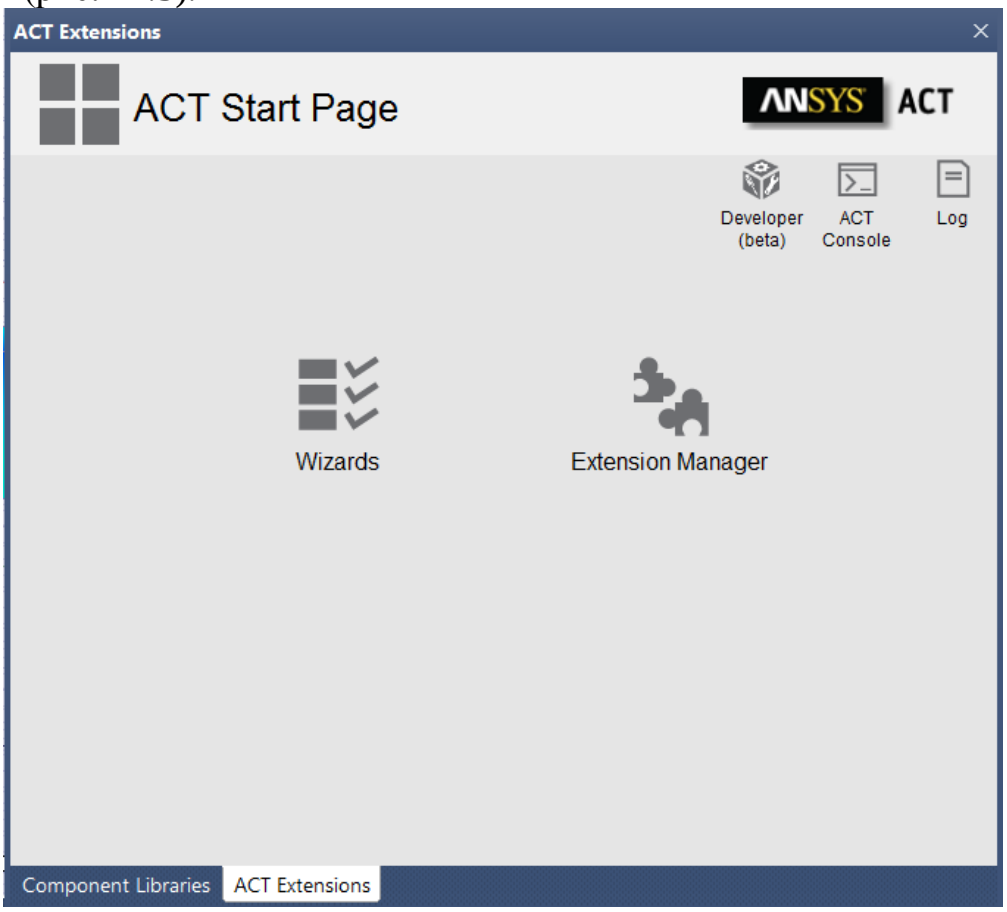


Рис. 12.5. Диалог программы связи между ***HFSS*** и ***SAVANT***

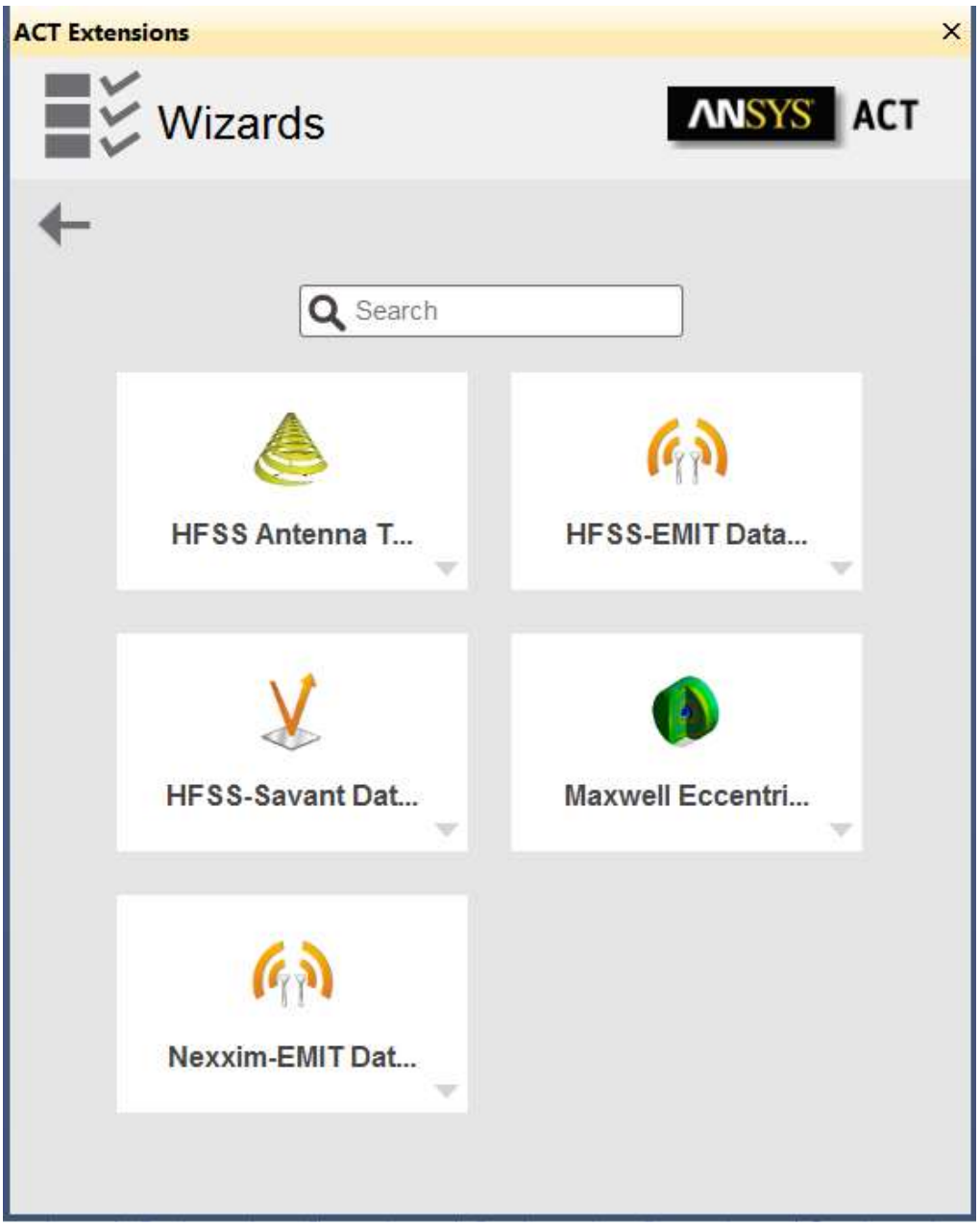


Рис. 12.6. Ассистент программы ***HFSS ANSYS***

Выберите иконку ***Wizards***. Затем нажмите на иконку с инструментом ***HFSS-Savant Datalink***. (рис. 12.6). В разделе, показанной панели конфигурации (рис. 12.7), объясняются эти установки. Одна из наиболее важных – это ***Geometry***.

Выберите режим ***NFBox*** в разделе ***Geometry***. Это изменит параметры геометрии (точки ***Min Point*** и точки ***Max Point***) выборок ближнего поля, чтобы согласовать размеры элемента ***NFBox*** в проекте.

Размеры бокса соответствуют требованиям для правильного экспорта ближнего поля, оставляя поле λ/10 вокруг щелевой антенны. Пользователь может изменить размеры окна выборки, но рекомендуется использовать заданные размеры, так как остальная часть примера будет использовать эту конфигурацию.

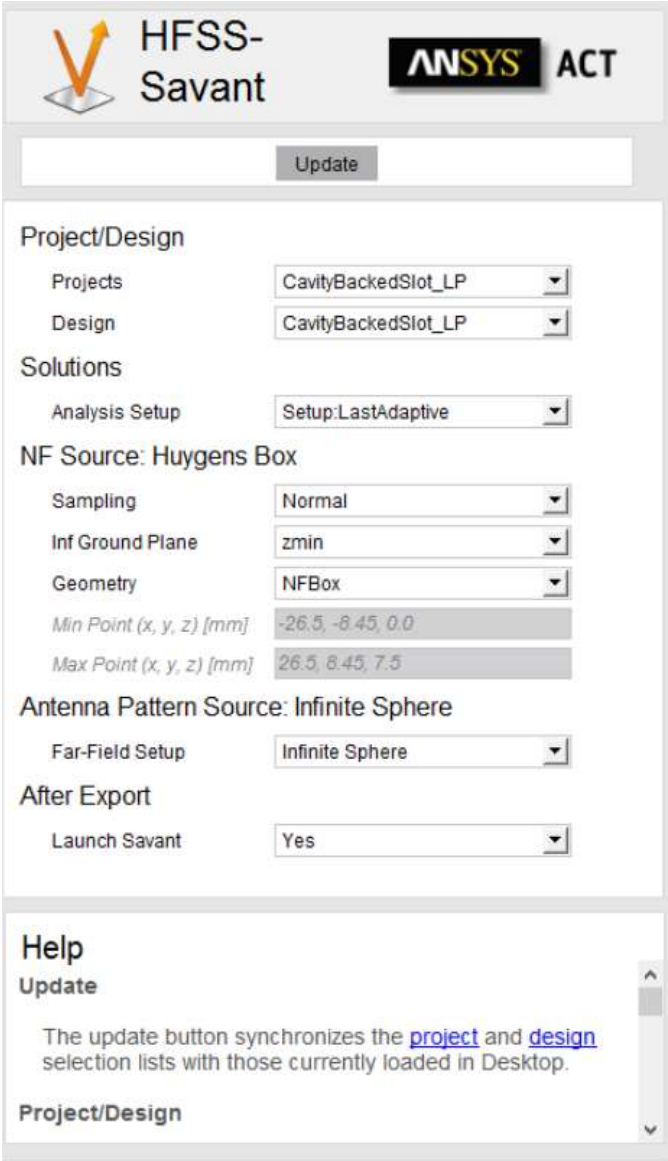


Рис. 12.7. Опции диалога связи между ***HFSS*** и ***Savant***

Большинство других настроек имеют только один возможный вариант, и по умолчанию настройки, содержащие более одного параметра, уже предварительно заполнены правильно.

Выборки ***Sampling*** содержит три варианта: ***Quick***, ***Normal*** и ***Custom***. По умолчанию выбран параметр ***Normal***, который устанавливает выборки точек ***NF Sampling NF*** = 16 точек на длину волны (***ppw***) и плотность точек **Field Sampling Density** = 8 ***ppw***. Первое значение задает плотность поля - плотность опорных точек на выбранной геометрии в программе ***Savant*** при экспорте из ***HFSS***. Второе значение определяет плотность источников тока, генерируемого ***Savant*** используя параметр ***Field Sampling Density*** после импорта антенны. Эти значения в дальнейшем могут быть изменены в программе ***Savant*** после того, как антенна импортирована. Для этой пары настроек рекомендуется соотношение 2:1. Например, можно установить 8 и 4

ppw соответственно (рис. 12.8). Опция ***Custom*** позволяет установить эти плотности выборки непосредственно.

Рис. 12.8. Установки выборки точек ближнего поля и плотности источников тока

Бесконечная плоскость ***Inf Ground Plane*** может быть установлена на любой из шести граней в окне выбора плоскостей, выявленных из геометрии. Экспорт ***HFSS*** включает информацию о земляной плоскости, и в некоторых случаях антенну можно автоматически сконфигурировать с узлом ***Ground Plane*** на стороне ***Savant***. Так обстоит дело с текущим проектом. Рекомендуется ознакомиться с конфигурацией земляной плоскости антенны перед экспортом. Если антенна расположена на земной плоскости (например, монопольной, щелевой, планарной и др.), бокс ***Geometry*** должен быть установлен так, чтобы касаться поверхности земляной плоскости в проекте ***HFSS*** и ***Inf Ground Plane*** должна быть установлена соответственно. Таким образом, когда Savant преобразует выборки ближнего поля в источники тока, он определяет, какую сторону поля игнорировать.

Launch Savant. Когда эта опция (рис. 12.7) установлена на ***Yes,*** инструмент автоматически откроет ***Savant*** с экспортированной антенной предварительно загруженной, когда инструмент завершает свою процедуру экспорта (которая инициируется, нажав кнопку ***Finish***). По умолчанию, ***Launch Savant*** установлен на "***Yes***". Если установлено значение ***No,*** то для экспорта антенны в директорию, в которую позже можно будет вручную импортировать в ***Savant***. Программа будет помнить любые изменения этого параметра для последующего экспорта. В данном случае, оставьте ***Launch Savant*** на значении "***Yes***".

Кликните кнопку ***Finish***. Этим начнется процесс экспорта. Когда он завершится, окно ***HFSS-Savant Datalink*** будет закрыто, возвращая вас обратно в окно ***ACT Extensions*** для выбора программы для запуска.

Новая директория, ***CavityBackedSlot_LP.hfsssbr***, будет создана в папке ***Tutorial10***. Она, в свою очередь, будет содержать подкаталог с именем ***CavityBackedSlot_LP.hfssnf***, и именно этот подкаталог будет впоследствии импортироваться в ***Savant***.

Если ***Launch Savant*** был установлен на ***Yes***, то ***Savant*** будет открыт с экспортированной предварительно нагруженной антенны. Если это так, пропустите первые два под-шага и приступите к шагу 2. Возможность прямого запуска ***Savant*** - это удобство, предназначенное для ускорения процесса проектирования. В некоторых расчетах ***Savant***, таких как связь

между двумя антеннами, запуск ***Savant*** непосредственно из ***HFSS*** может не быть полезным.

Сохраните проект и ***AEDT***. Этим завершается шаг 1.

12.1 Загрузка и экспорт проекта в *Savant*

Запустите ***Savant*** и кликните ***Add Near Field Antenna...*** в главном меню. Найдите директорию ***Tutorial10\CavityBackedSlot_LP.hfsssbr***, содержащую папку ***CavityBackedSlot_LP.hfssnf*** , и откройте ее.

Если вы пропустили шаг 1, вы можете найти ранее созданную копию этой папки (***CavityBackedSlot_LP.hfssnf***) в директории ***Tutorial10***. Новый узел ***Near Field Antenna*** появляется под узлом ***Scene*** с именем ***CavityBackedSlot_LP***.

В окне **3D – Scene**, маленькая цветовая шкала соответствует выборкам данных из поля в ближней зоне дискретизации сетки. Эти выборки находятся на геометрической коробке (т. е., ***NFBox***). Большой фиолетовый блок под ней - это металлический бокс, в котором находится щель, по размеру меньшая внутренней полости. Верхняя поверхность большой металлической коробки также служит земляной плоскостью во время моделирования в ***HFSS***. Наконец, большие, плоские, полупрозрачные, зеленые поверхности, которые формируют маленькие и большие боксы, рассматриваются ***Savant*** как земляная плата импортированного ближнего поля антенны. Она совпадает с плоскости ***zmin NFBox*** из проекта ***hfss*** по значению выбранного ***zmin*** (по умолчанию) для установки ***Inf Ground Plane*** в ***Datalink***. Роль этой земляной плоскости в ***Savant*** - исключить источники тока, формируемые на нижней плоскости ***NFBox*** (рис. 12.9).

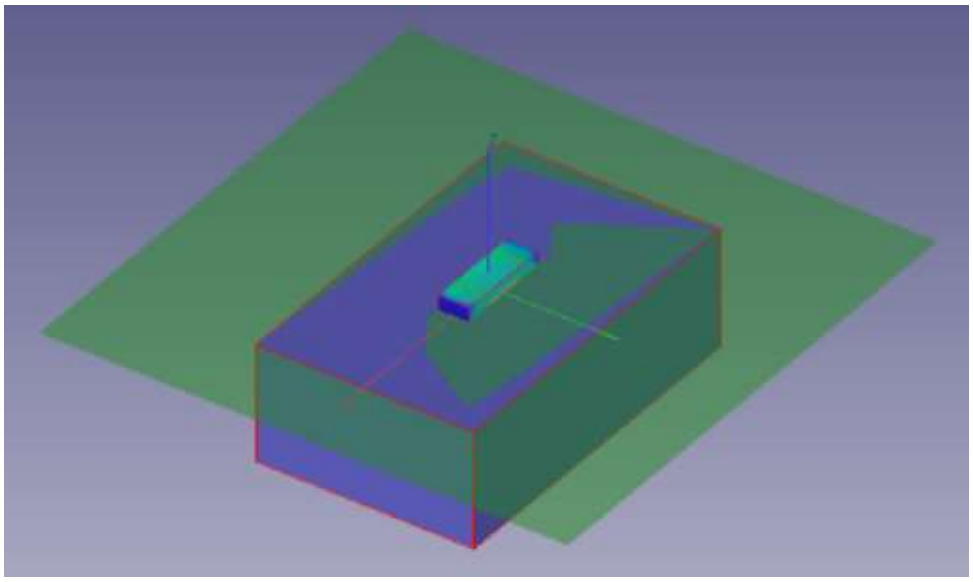


Рис. 12.9. Земляная плата снизу малого бокса

Цветовая шкала по умолчанию устанавливается в соответствии с максимальными и минимальными значениями выборок ближнего поля. Это, возможно, потребуется скорректировать, чтобы иметь более значимое представление выборок поля.

Отключите видимость ***Ground Plane 1***, находящуюся под ***CavityBackedSlot_LP: Ground Planes***. Зеленая земляная плоскость исчезает из окна ***3D - Scene***.

Включите кнопку ***Show Color Map,*** расположенную в инструментальной линейке окна ***3D – Scene***. Цветовая шкала появится с правой стороны окна ***3D - Scene***. Чтобы создать масштабирование по цвету дискретных плотностей тока, сравнимых с теми, приведенные в данном примере (для антенны, которая импортирована из HFSS), следующие параметры должны быть установлены в цветовой панели.

- ***Electric Currents***
  - Модуль: 0.0 … 0.21 A/m
  - Шкала в дБ: -50 …. -10 dB(A/m)

- ***Magnetic Currents***
  - Модуль: 0.0 to 140 V/m
  - Шкала в дБ: 25 … 45 dB(V/m)

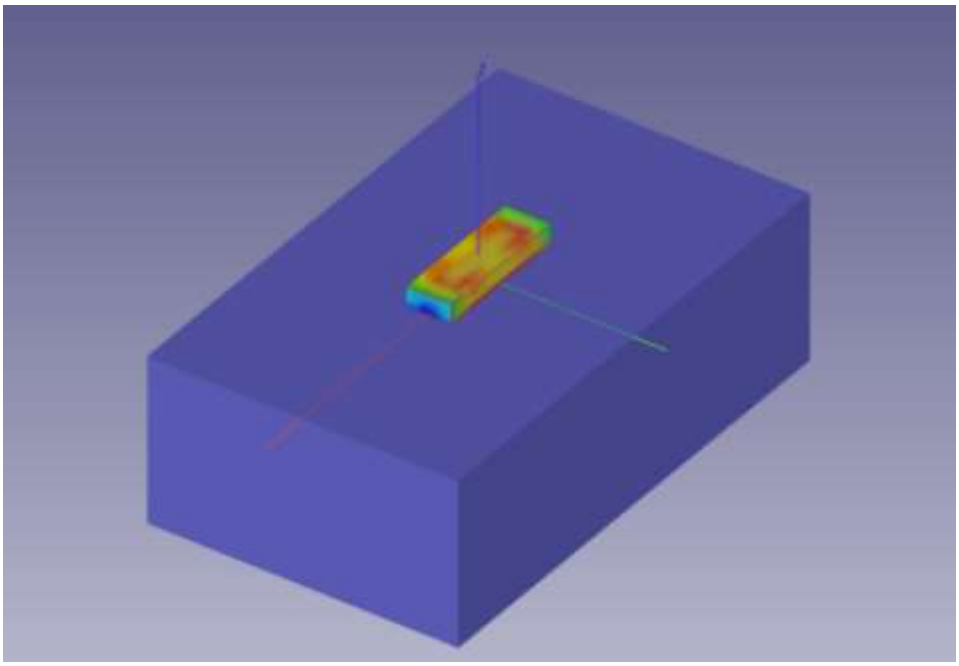


Рис. 12.10. Большой и малый боксы с ближним полем

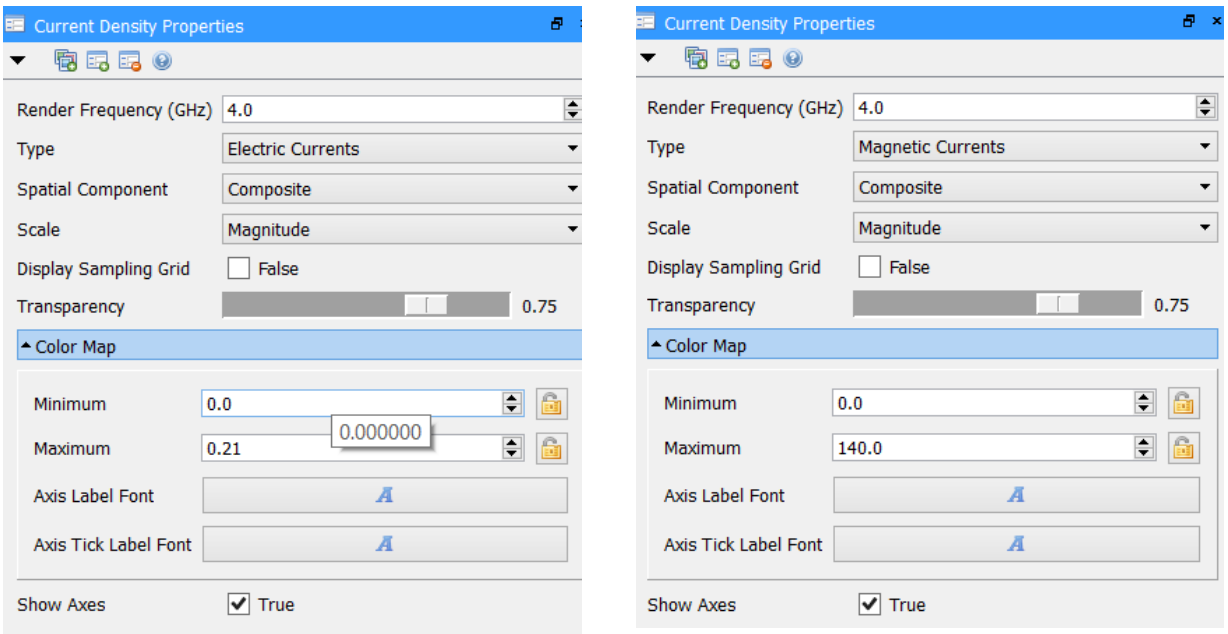


Рис. 12.11. Масштаб цвета в выводе электрических и магнитных полей

Изображение в окне ***3D - Scene*** (рис. 12.10) показывает щелевую антенну в полости большого бокса с цветовой шкалой ближнего поля на маленьком боксе, ограждающем щель, при плотности электрического тока в шкале ***Magnitude*** (рис. 12.11).

Кликните кнопку ***Clip Plane Dialog*** в окне ***3D – Scene***.

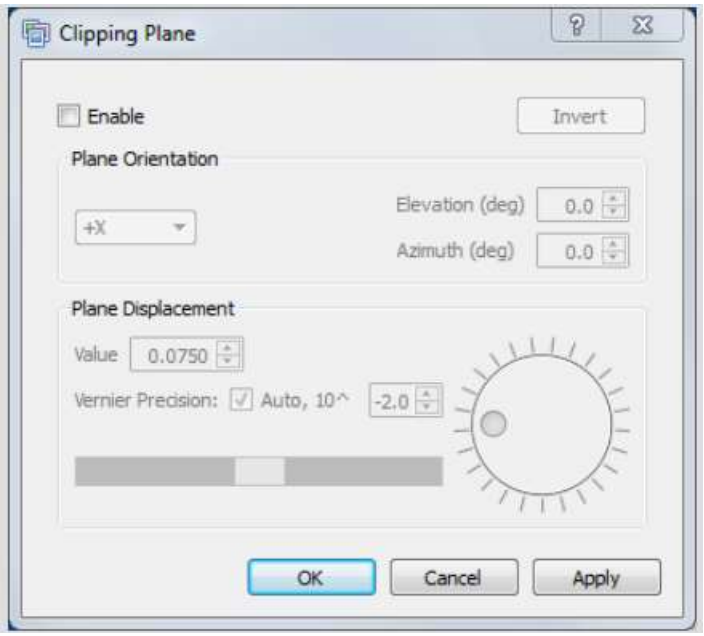


Рис. 12.12. Блок плоскости сечения

В диалоге ***Clipping Plane***, включите ***Enable*** и установите селектор ***Plane Orientation*** на *+X* (рис. 12.12). В разделе ***Plane Displacement***, в поле ***Value*** установите (0.0). Кликните ***Apply***. Можно видеть внутреннюю структуру щелевой антенны в металлической полости (рис. 12.13).

Импортированная структура антенны не играет никакой роли в моделировании в ***Savant***. Она только нужна для просмотра установки и ориентации антенны на платформе.

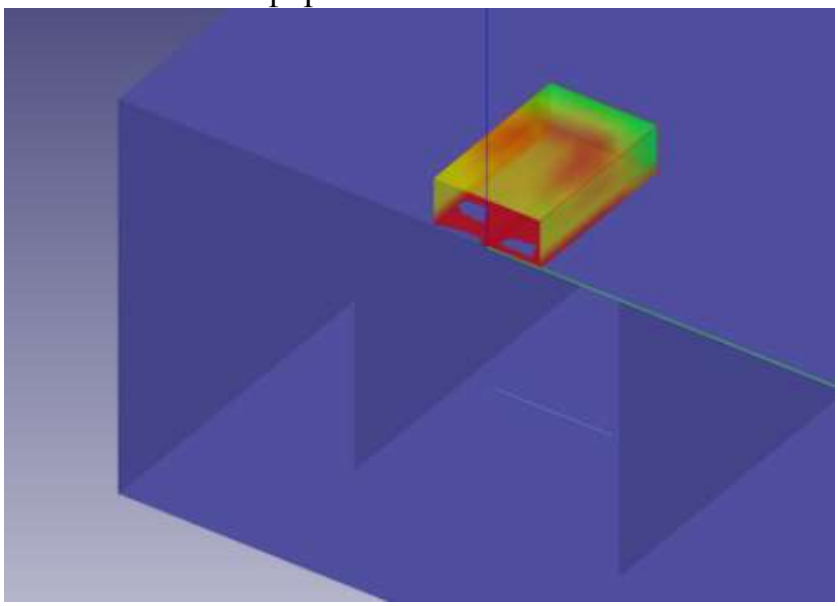


Рис. 12.13. Вскрытая структура большого и малого бокса

В диалоге ***Clipping Plane***, отключите ***Enable*** и кликните ***OK***.

Разверните узел ***CavityBackedSlot_LP*** в дереве проекта. Дважды кликните на узел ***Current Density***. Специальное 3-D окно с именем ***3D - Current Density*** появляется для отображения плотности тока на боксе выборки ближнего поля (рис. 12.14).

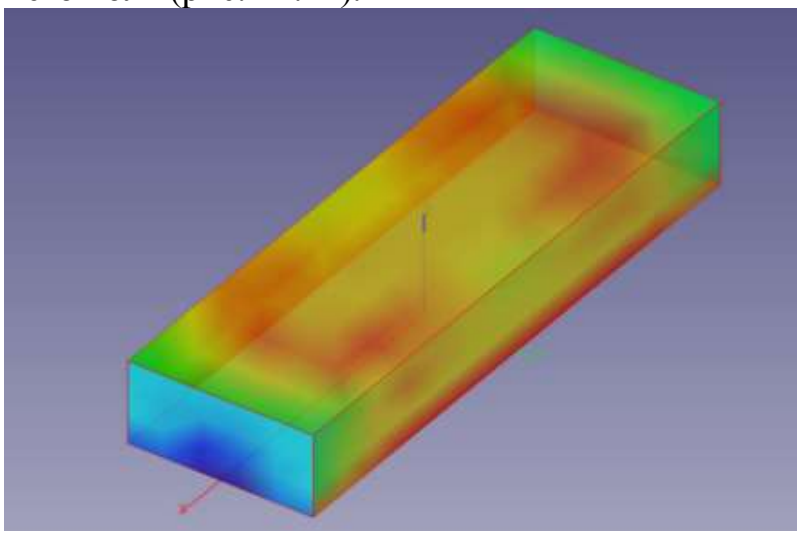


Рис. 12.14. Плотность тока на поверхности бокса ближнего поля

Узел ***Current Density*** конфигурирует визуализацию данных импортированного поля, которое сводится к плотности эквивалентного тока для показа в цветовой шкале.

В панели свойств узла ***Current Density*** установите ***Spatial Component*** как *X* (рис. 12.15).

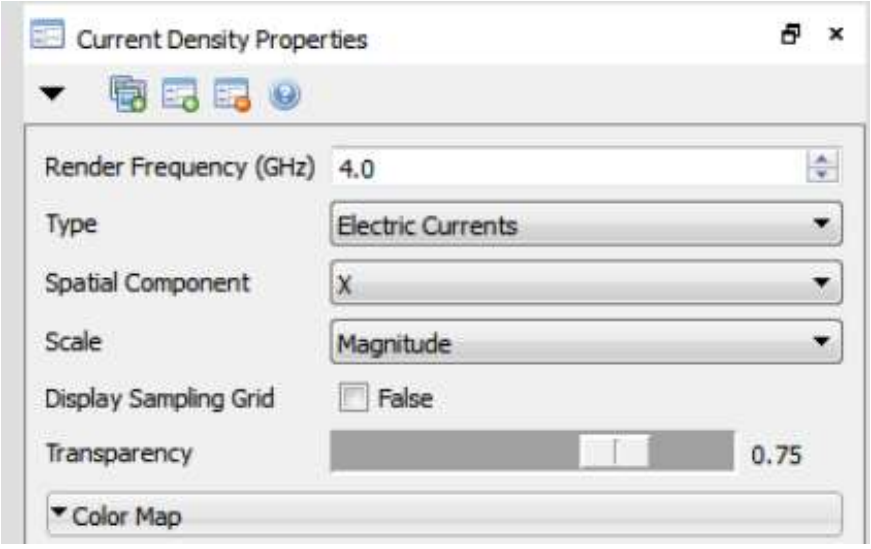


Рис. 12.15. Блок установки свойств электрического тока на поверхности NFBox

График подставляется для показа компоненты $\boldsymbol{J_x}$ эквивалентных электрических токов равных плотностей (рис. 12.16).

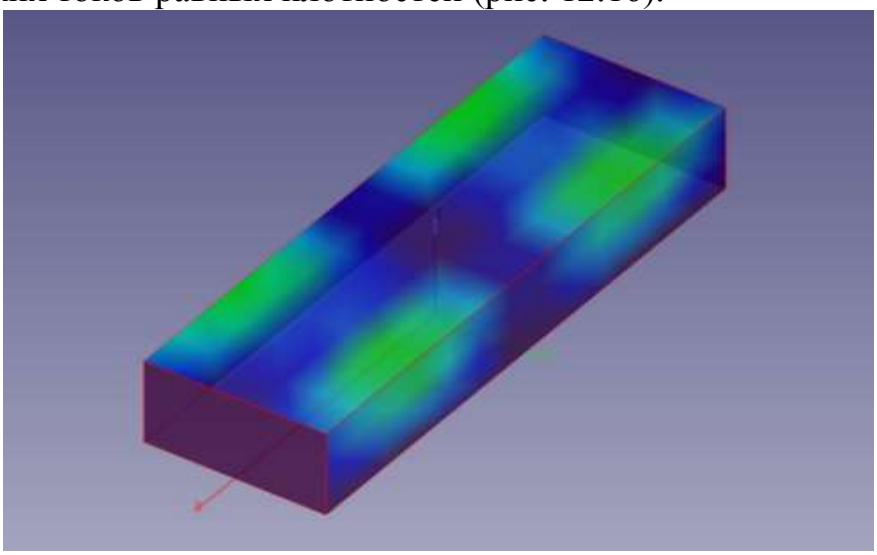


Рис. 12.16. Плотность тока на поверхности бокса NFBox

На каждой стороне бокса выборки поля, плотность эквивалентного электрического тока, $\boldsymbol{J}$ равна векторному произведению нормали на вектор магнитного поля $\boldsymbol{H}$. Следовательно, на верхней плоскости бокса (перпендикулярной оси *z*), $\boldsymbol{J} = -\boldsymbol{H_y}$. Аналогично, на гранях, перпендикулярных оси *Y*, $\boldsymbol{J_x} = +/- \boldsymbol{H_z}$. На гранях, перпендикулярных оси *X*, $\boldsymbol{J_x} = 0$.
Установите ***Type*** как ***Magnetic Currents***, а ***Scale*** на ***Decibel*** (рис. 12.17).

Плотность магнитного тока находится по электрическому полю, по формуле $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{n} \times \boldsymbol{E}$, где $\boldsymbol{n}$ - нормаль к грани коробки. На верхней грани имеется N точек в +Z-направлении. Поскольку ***Spatial Component = X***, мы имеем $\boldsymbol{M_x} = \boldsymbol{E_y}$ на верхней стороне.

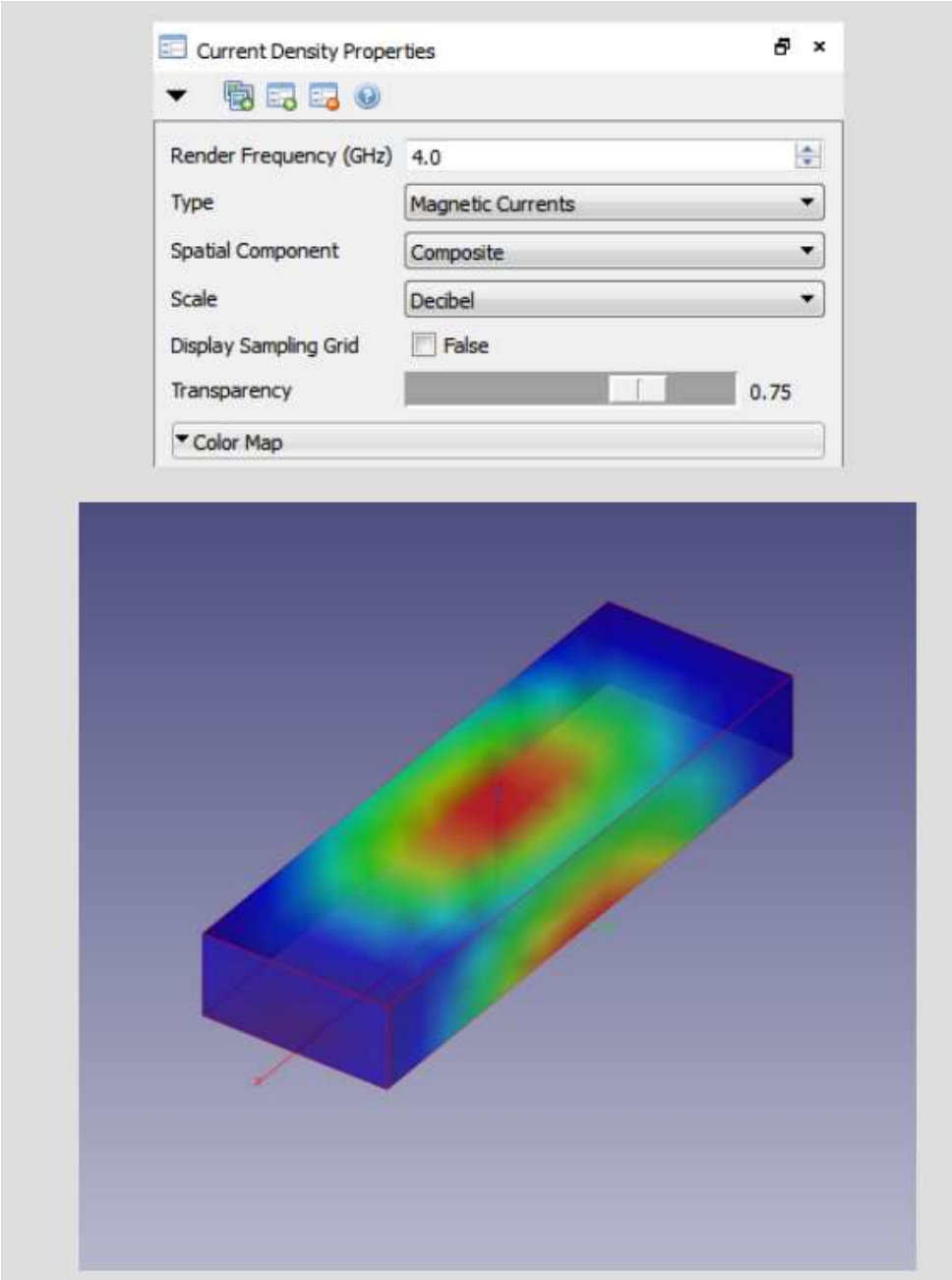


Рис. 12.17. Установка свойств магнитного тока и просмотр магнитных токов

Как и следовало ожидать, электрические поля поперечны к более длинной размерности резонансной щели, как можно подтвердить, установив ***Spatial Component = Y*** и наблюдая, что $\boldsymbol{M_y = -E_x}$, токи сравнительно очень слабые на верхней грани (проверьте это).

Внесите исходные установки узла ***Current Density*** (рис. 12.18).

- ***Type*** = ***Electric Currents***
- ***Spatial Component = Composite***
- ***Scale = Magnitude***
- ***Color Map. Maximum***=0.21. ***Minimum***=0.0

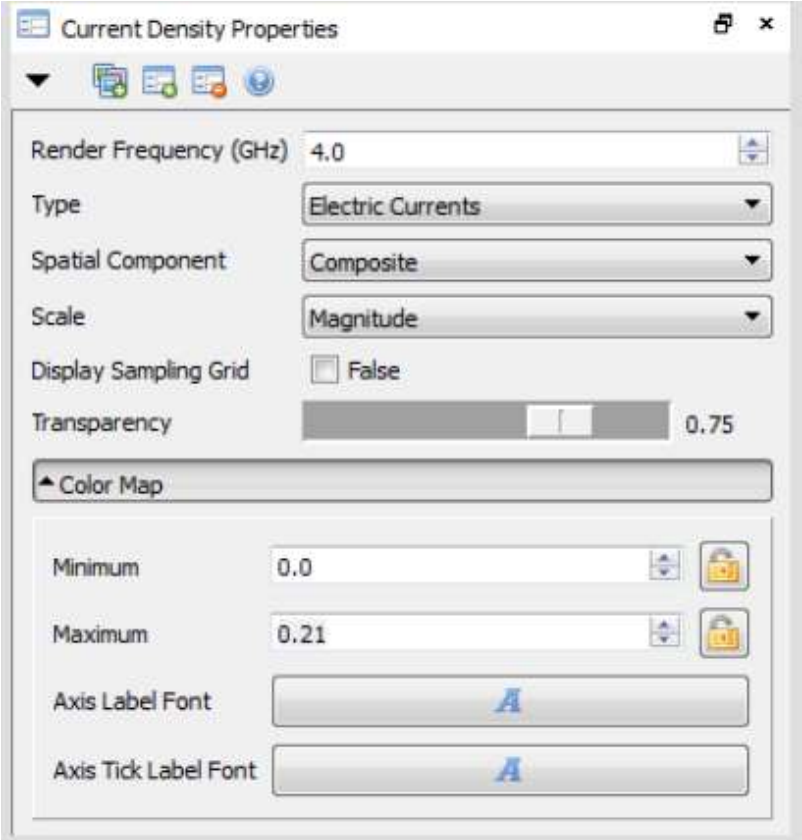


Рис. 12.18. Установки параметров видимости электрических токов

Закройте окно ***3D - Current Density*** и сохраните проект в директории ***Tutorial10*** как ***b737-place1.savant***.

12.2 Генерация источников тока для антенны

Выберите узел ***Analysis:Frequency***, в котором выберите частоту 4.0 GHz. Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP*** и установите ***Field Sample Density = 8 (per λ).***

Включите видимость узла ***Ground Plane 1***, находящегося под узлом ***Ground Planes***. В этом случае антенна была экспортирована с помощью ***Datalink*** с включенной информацией о земляной плоскости, а узел ***Ground Plane 1*** был автоматически создан при импорте антенны в ***Savant***.

Если информация о земляной плоскости отсутствует при экспорте ***Datalink***, или некорректна, пользователь может создать или модифицировать узел ***Ground Plane,*** которая нужна для этого типа антенны. Для создания узла ***Ground Plane*** нужно выбрать узел ***Ground Planes*** в дереве проекта и нажать кнопку ***Add Near Field Ground Plane*** в инструментальной линейке выше панели свойств, тогда создастся ***Ground Plane*** под группой ***Ground Planes***.

Для правильной работы узел ***Ground Plane*** в ***Savant*** должен иметь ***Orientation*** и ***Offset***, настроенные в локальных координатах антенны, чтобы быть копланарным с земляной плоскостью ***PEC*** импортированной антенны.

Программа может в некоторых случаях автоматически определять существование земляной плоскости при загрузке проекта. В этом случае не требуется дополнительной корректировки.

Щель моделируется с большой земляной плоскостью. Щель является частью класса антенн, которые требуют, чтобы земляная плоскость быть установлена и функционировала правильно. Другими примерами этого были бы монопольные и микрополосковые антенны.

Экспортированный бокс имел размеры в несколько длин волн, входящие в кромки земляной плоскости (Offset=0 на рис. 12.19). Это означает, что бокс ближнего поля приблизительно соответствует тому, что щель была установлена в действительно бесконечной земляной плоскости.

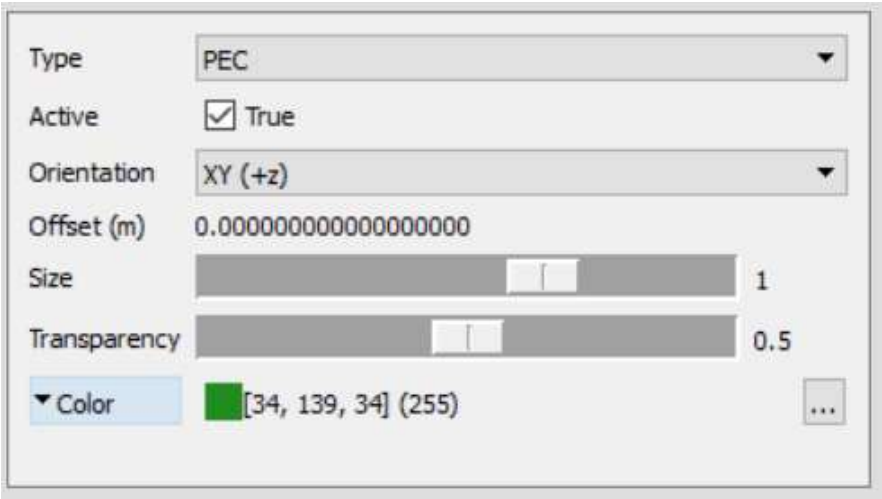


Рис. 12.19. Свойства земляной плоскости

В ***Savant*** щель предназначена для размещения на металлической поверхности платформы, которая будет служить его фактическим заземлением. В действительности мы будем моделировать сечение щели на поверхности платформы. Для антенн с такой земляной плоскостью, нам нужны только эквивалентные источники тока на пяти (5) открытых плоскостях малого бокса. Наличие правильно сконфигурированного узла **Ground Plane** является чрезвычайно важной задачей в этом процессе моделирования. Этот узел позволяет ***Savant*** игнорировать сторону бокса, совпадающую с земляной плоскостью, когда она интегрирует выборки плотности ближнего поля в эквивалентные источники тока.

Это может показаться удивительным, что эта единственная грань бокса, которая исключается, когда выборки полей преобразуются в источники тока. Однако это правильный подход. В контексте, в конечном счете, размещение этой антенны на металлической поверхности платформы, дало бы в лучшем случае двойной учет физики, при включении этой нижней грани. В худшем случае мы оказались бы с источниками тока под поверхностью платформы, излучая лучи в интерьер платформы. Хотя плотности тока на других пяти гранях более диффузны и, очевидно, не раскрывают геометрию щели из-за их

смещения с него, они точно восстанавливают свои свойства излучения в любой точке снаружи от бокса выборок.

Выберите снова узел ***CavityBackedSlot_LP*** и кликните кнопку ***Generate Current Sources*** в инструментарии выше панели свойств. Savant интегрирует выборки плотности тока для создания эквивалентных источников тока. Под узлом ***CavityBackedSlot_LP*** создается узел ***Current Sources*** и узел ***Pattern***.

Дважды нажмите на новый созданный узел ***Current Sources*** для проверки источников тока в окне 3D. Внизу панели свойств ***Current Sources***, отключите опцию ***Ghost Sources***. При этом скрываются изображения источников, созданные земной плоскостью (рис. 12.20). Они предназначены только для визуализации и не будут выступать в качестве источников излучения в ***Savant*** моделирования, даже если отображаются.

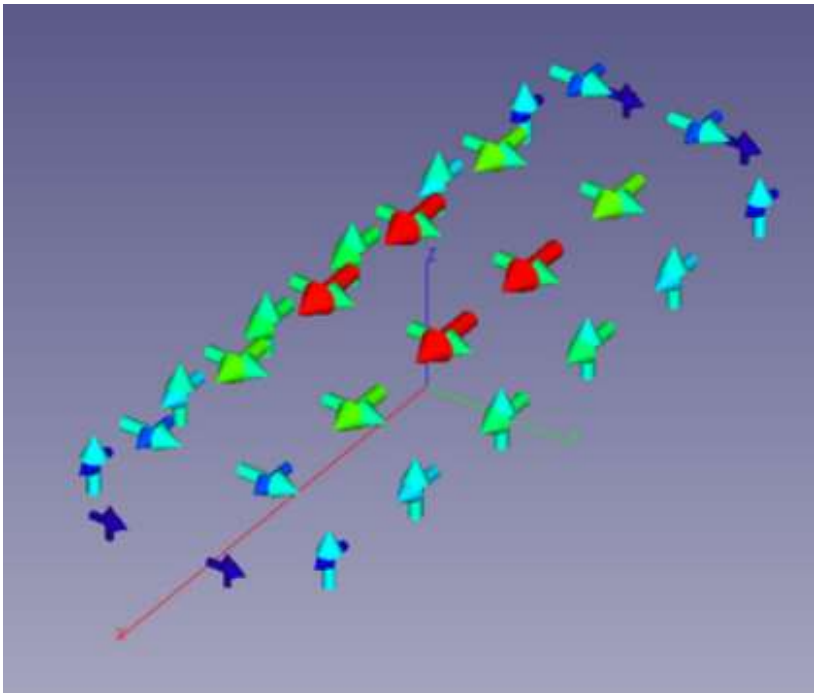


Рис. 12.20. Эквивалентные источники тока

Закройте окно ***3D - Current Sources***. Отключите опцию в узле ***Current Sources*** (под столбцом ***Visible*** в дереве проекта). Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***.

Разверните папку панели ***Antenna Information***. В ней показывается, что 56 магнитных и 56 электрических источников тока было создано для представления свойств излучения щелевой антенны (рис. 12.21). Количество автоматически регулируется в поле "***Field Sample Density***" настройка плотности, и 8-на-длину волны (по умолчанию) обычно достаточно для точности.

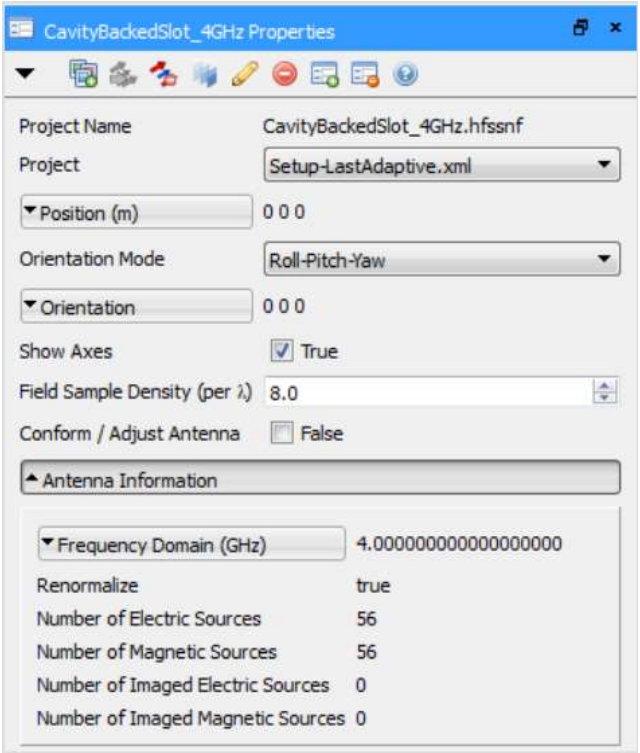


Рис. 12.21. Окно свойств щелевой антенны

12.3 Вставка щелевой антенны в самолет

Кликните кнопку ***Add CAD...*** в главном меню Savant и откройте ***Tutorial10/Boeing737-500_meter.facet***. В диалоге ***Scale CAD Model on Import***, которое появится, выберите метры и кликните ***OK***. Появляется 3D изображения самолета B-737 (рис. 12.22).

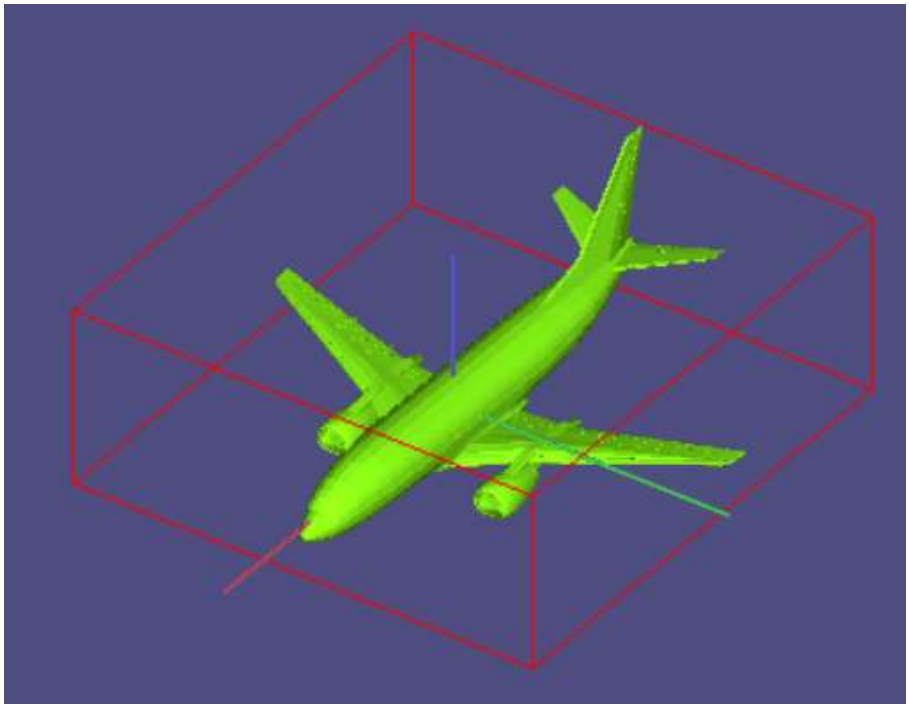


Рис. 12.22. Модель самолета ***B-737***

12.3.1 Размещение щелевой антенны в боксе

Вставим щелевую антенну в нижнюю часть горизонтального левого заднего стабилизатора. Щелевая антенна будет излучать вниз. Кликните кнопку ***Bottom View*** в окне ***3D – Scene***.

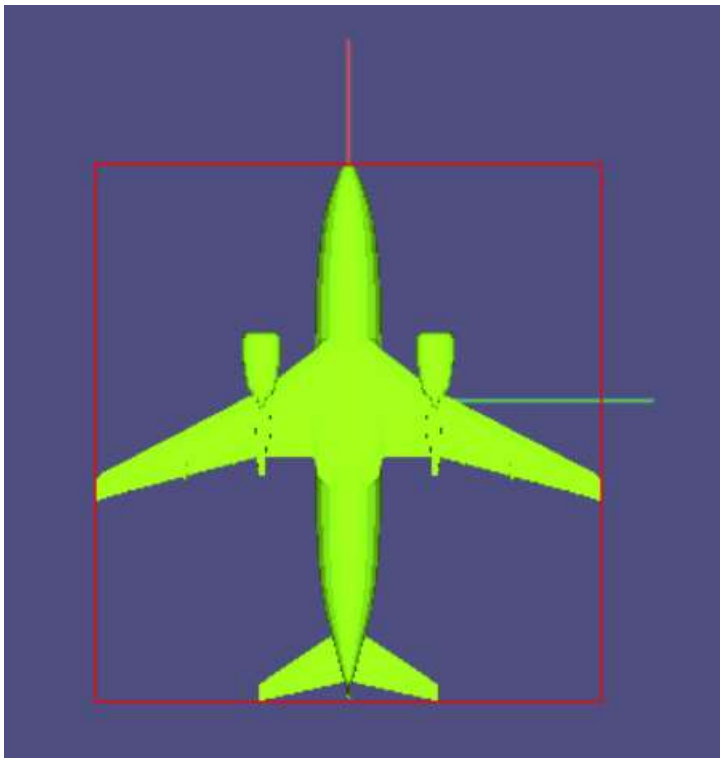


Рис. 12.23. Расположение самолета в режиме просмотра снизу

Увеличьте левую заднюю часть самолета так, чтобы он выглядел, как на рис. 12.24. На изображении антенна уже размещена на стабилизаторе. Нужно выполнить операцию размещения антенны с помощью точного нажатия на эту точку курсором мыши.

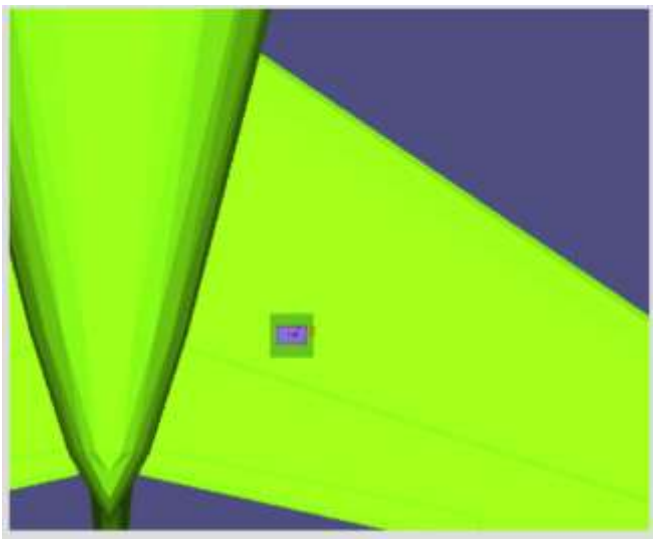


Рис. 12.24. Антенна на стабилизаторе самолета

Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***. Кликните кнопку ***Place Object Tangent to Surface***, в инструментальной линейке ***3D – Scene***. Кнопка углубится, как показано на рис. 12.25.

Рис. 12.25. Линейка меню графического окна

Расположите курсор мыши в окне ***3D - Scene*** в указанном месте размещения, и не важно, что он не установлено точно.

Нажмите клавишу ***Ctrl*** и левую кнопку мыши. Щелевая антенна перемещается в место размещения с касательной плоскости XY к поверхности размещения. Увеличьте видимость размещенной антенны (рис. 12.26).

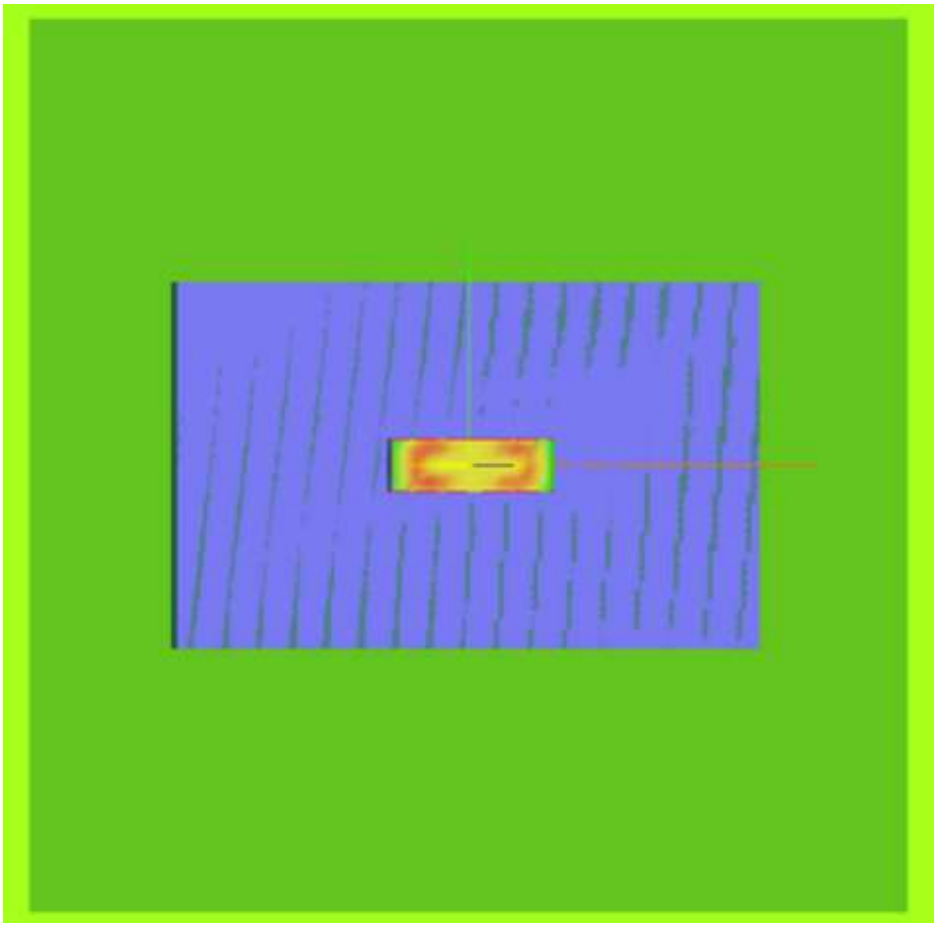


Рис. 12.26. Щелевая антенна на крыле

Нажмите кнопку ***Rotate around Node***, чтобы повернуть узел на панели окна *3D - Scene*. При этом антенна будет центрироваться в окне во время вращения вида. Поверните вид так, чтобы антенна просматривалась под наклонным углом, как показано на рис. 12.27.

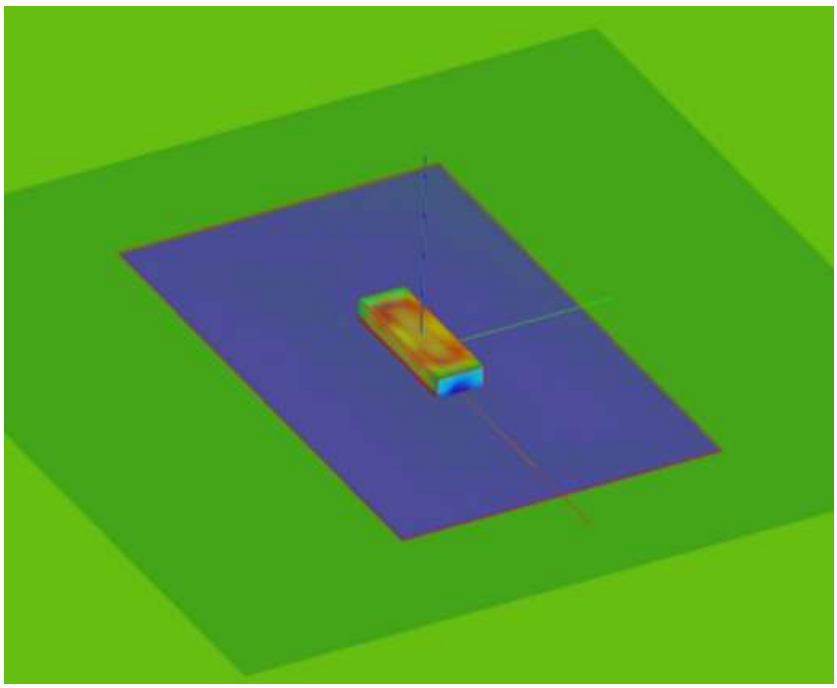


Рис. 12.27. Щелевая антенна на крыле в аксонометрии

Раскройте папку панели ***Relative Position*** в панели свойств ***CavityBackedSlot_LP*** (рис. 12.28).

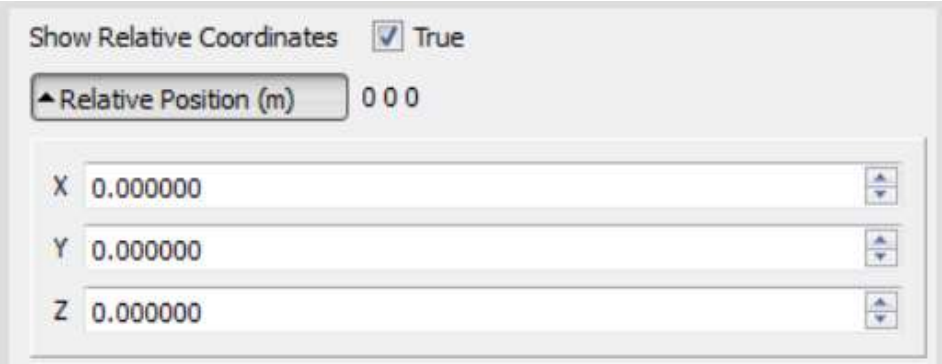


Рис. 12.28. Выбор положения антенны в относительной системе координат

Подстройте установку *Z* (высота антенны) положения *Relative Position* на увеличение -0.001m (1 мм) так чтобы земляная плата поднялась так, что земляная плоскость ***PEC*** как раз едва выступала над поверхностью размещения.

Сначала опустите земляную плоскость ***PEC***, чтобы она стала по крайней мере частично скрытой, а затем снова сдвиньте ее до тех пор, пока она не будет хорошо видна.

Точное положение антенны приводится на рис. 12.38 (ниже). Ваша позиция может немного отличаться из-за интерактивного размещения антенны в точке и щелкнув левой кнопкой мыши.

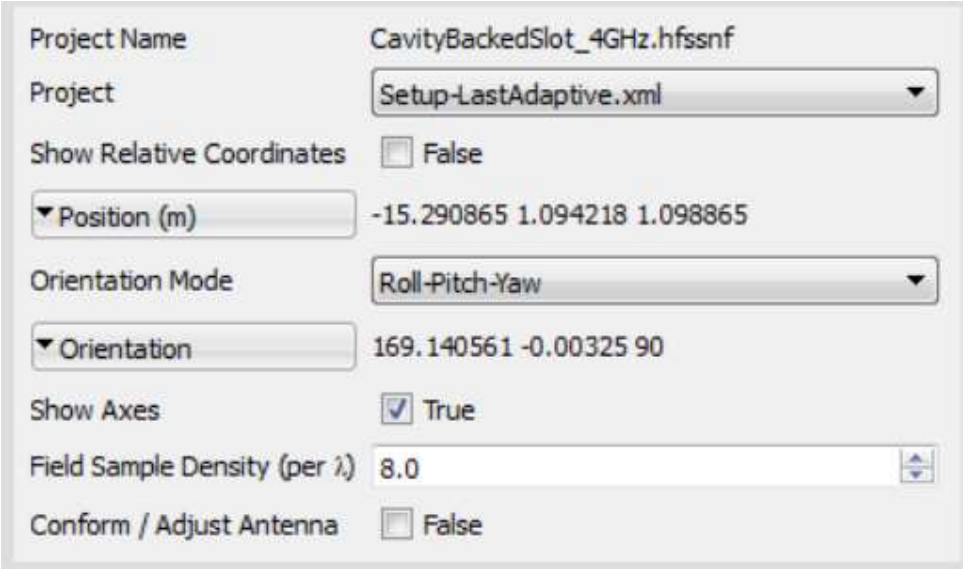


Рис. 12.29. Установка координат щелевой антенны на корпусе

12.3.2 Проверка согласования резонансной полости антенны

Кликните кнопку ***Default View*** в окне ***3D - Scene***. Вид сосредоточен на точке установки антенны, потому что ***Rotate around Node*** по-прежнему активен.

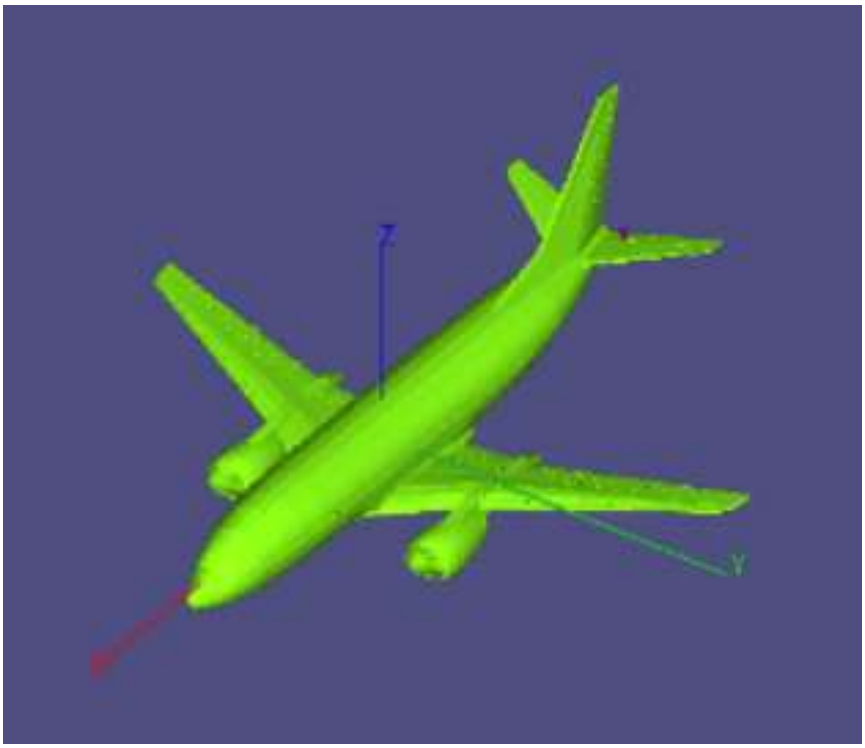


Рис. 12.30. Модель самолета в глобальной системе координат

Кликните кнопку ***Clip Plane Dialog*** в окне ***3D – Scene***.

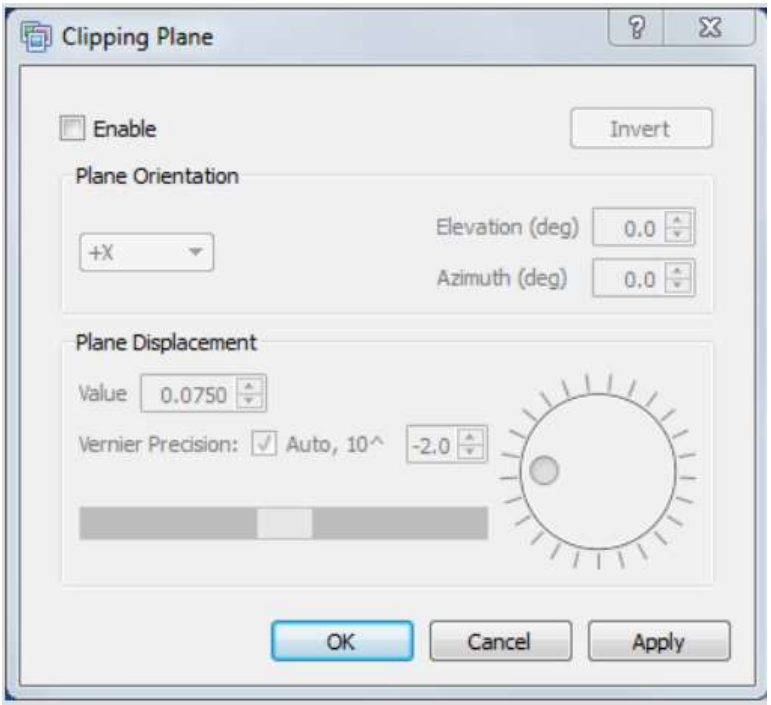


Рис. 12.31. Активизация плоскости разреза

В диалоге ***Clipping Plane*** (рис. 12.31), выберите опцию ***Enable***. Установите селектор ***Plane Orientation*** на +*X*. В разделе ***Plane Displacement*** выберите ***Value*** = (0.0). Кликните ***Apply***.

Передняя половина самолета отрезается из картины просмотра (рис. 12.32).

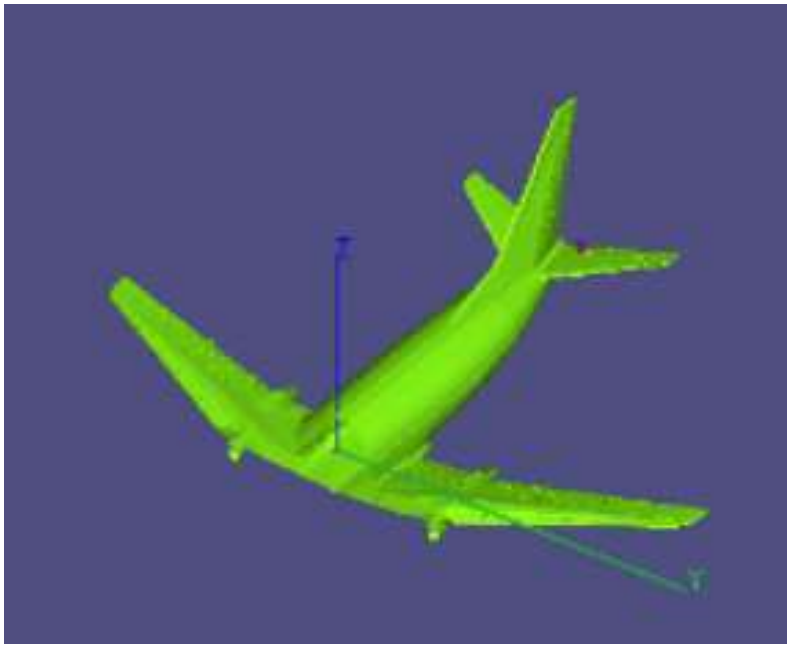


Рис. 12.32. Срез передней части самолета

В разделе ***Plane Displacement*** (рис. 12.33) сдвиньте горизонтальный ползунок влево до тех пор, пока не будет видна только хвостовая часть. Значение ***Plane Displacement Value*** будет обновляться соответствующим образом со значением в окрестности -12 (метров)

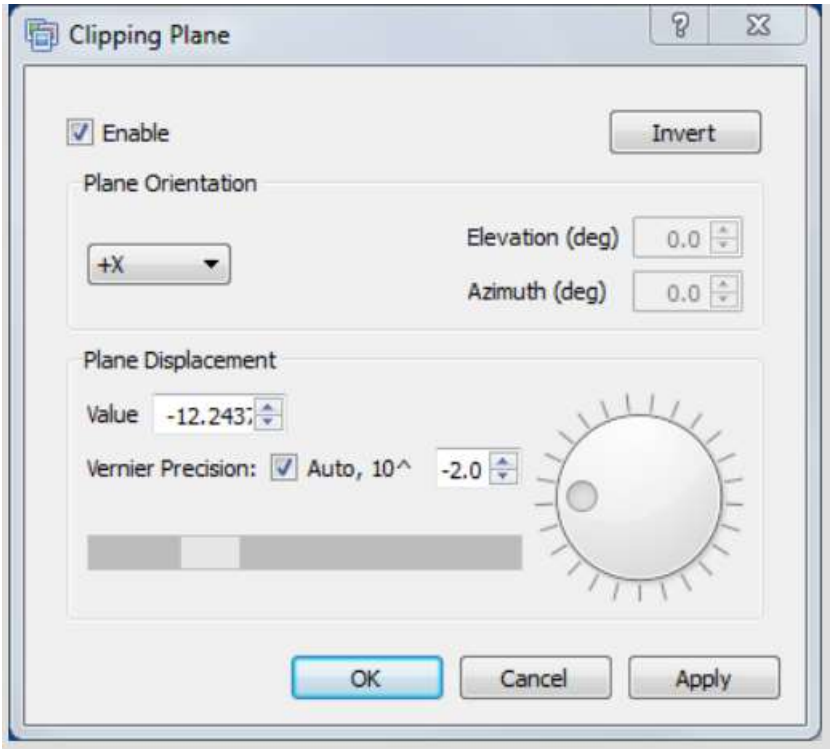


Рис. 12.33. Диалог плоскости разреза

Увеличьте изображение так, чтобы хвостовая часть заполнило окно (рис. 12.34).

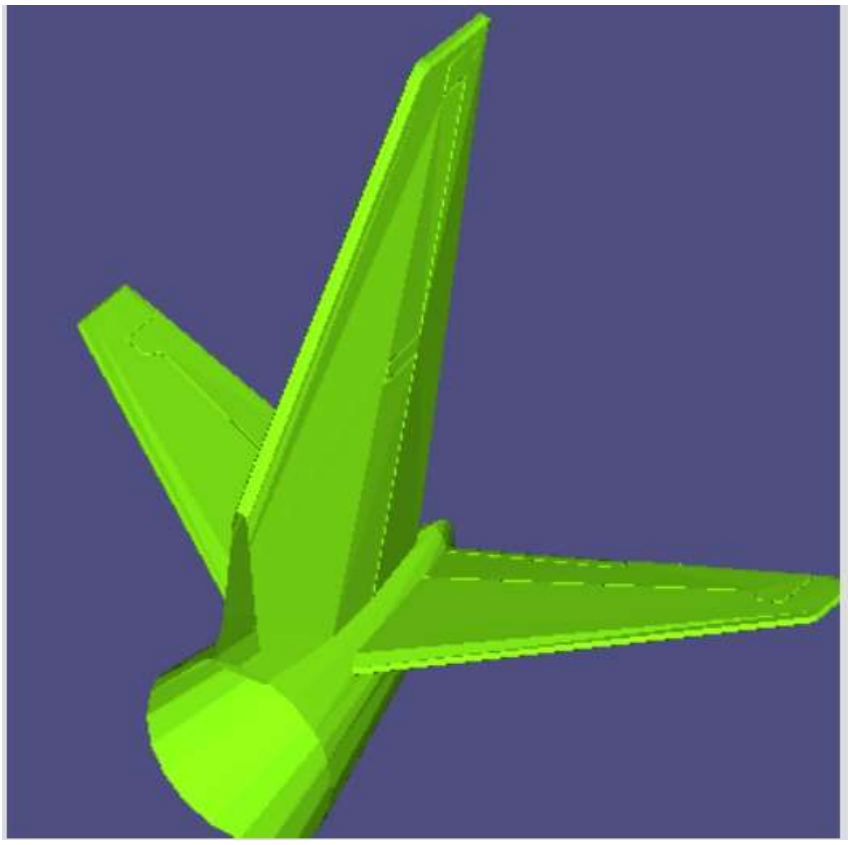


Рис. 12.34. Срезанный корпус самолета

В диалоге ***Clipping Plane***, поверните большой счетчик по часовой стрелке циферблата (рис. 12.33).

Проверните большой круг против часовой стрелки. При вращении циферблата с высокой точностью сдвигается плоскость среза, при вращении может потребоваться отпустить кнопку мыши, чтобы вызвать обновления в окне 3D-сцены.

Подстройте шкалу до тех пор, пока плоскость сечения как раз не начнет достигать края горизонтальных стабилизаторов, где они пересекают фюзеляж.

Величина ***Plane Displacement Value*** покажет значение около -13.7.

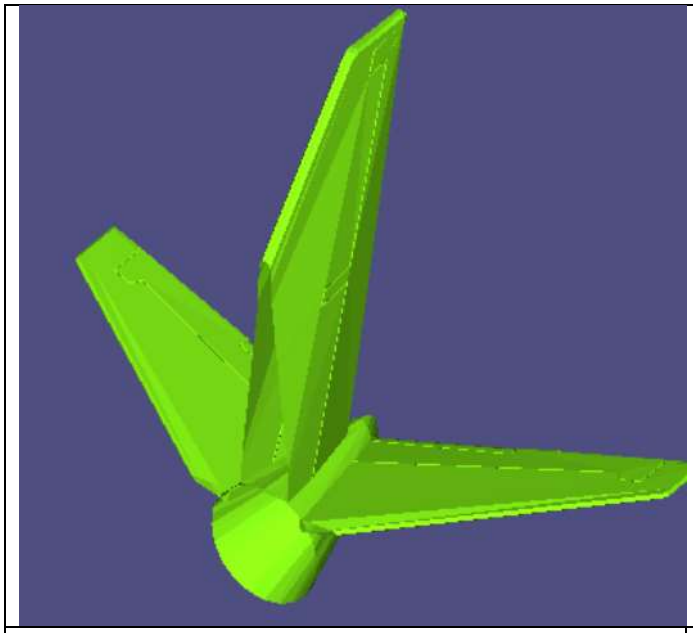


Рис. 12. 35. Разрез модели самолета

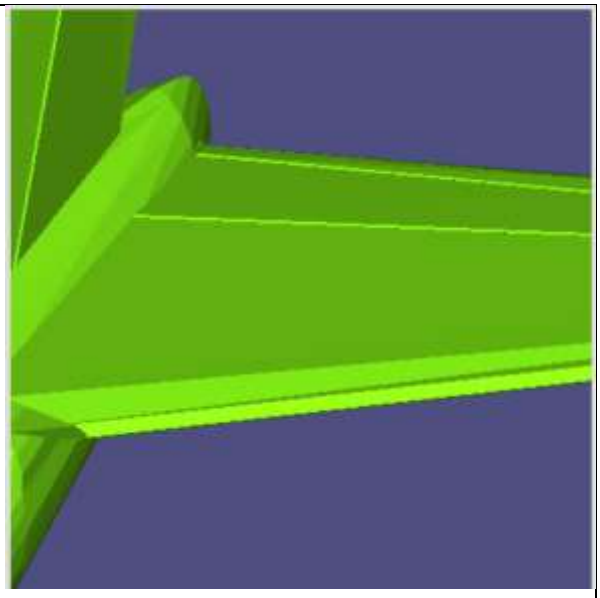


Рис. 12.36. Крыло самолета, на которое будет устанавливаться антенна

Увеличьте и поверните изображение так, чтобы внутренняя часть левого стабилизатора (справа в поле зрения) заполняла окно.

Продолжайте вращать отсеченную плоскости циферблата против часовой стрелки до тех пор, пока полость антенны явно видно, а секущая плоскость-это просто касается к ней. Величина ***Plane Displacement Value*** будет показывать значение около -15.2.

Поверните вид так, чтобы получить более лучшую перспективу и убедиться, что пространство внутри стабилизатора включает полость, по крайней мере в контексте этой модели CAD. Помните, что в этом представлении полость вытягивается вверх от поверхности щели, которая касательна к нижней части стабилизатора (рис. 12.38).

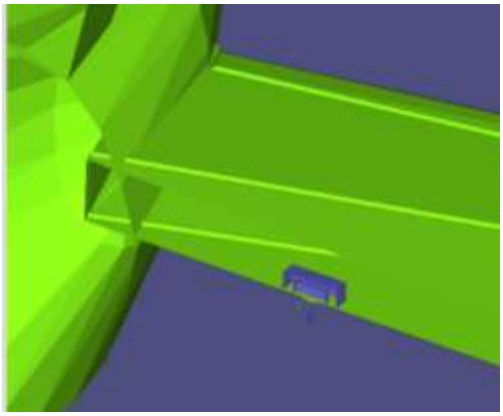


Рис. 12.37. Щелевая антенна в крыле

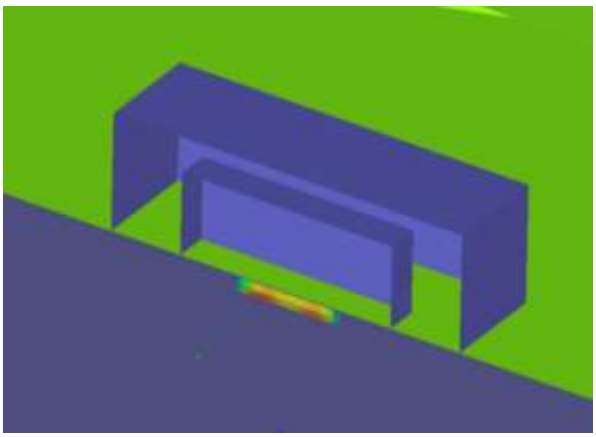


Рис. 12.38. Видимость щелевой антенны в крыле

В диалоге ***Clipping Plane*** отключите **Enable** и кликните **ОК**.

Кликните кнопку ***Default View*** в окне ***3D - Scene***

Выберите узел ***Scene*** и кликните кнопку ***Rotate around Node***. Это сделает центр глобальной системы координат центром вращения.

Кликните снова кнопку ***Default View***. Теперь вид будет центрироваться в глобальной системе координат.

Сохраните проект.

12.4 Расчет ДН дальнего поля в двух сечениях и нанесение результатов на графики

Выберите узел ***Analysis*** и установите ***Analysis Type*** как ***Far-field Pattern***. (рис. 12.39). Установите передающую антенну ***Tx Antenna*** как ***CavityBackedSlot_LP***.

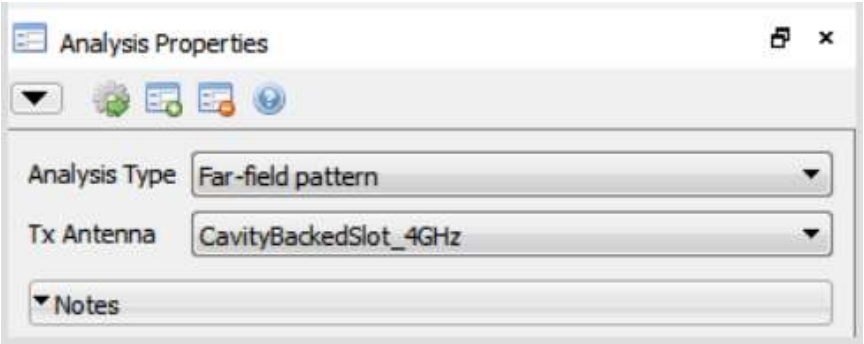


Рис. 12.39. Установка режима анализа

Выберите узел ***Far-Field*** под ***Analysis***. Установите *Far-field Type* на *Sector*. Установите *Azimuth Range: Start = 0, Stop = 90°, Number of Steps = 1*. Установите *Elevation Range: Start = -90°, Stop = 270°, число шагов = 360.* (рис. 12.40).

Установите *Phase Center* на *Tx Origin*. Центр окружности дальнего поля смещается от своего положения по умолчанию в начале глобальной системы координат к точке размещения щелевой антенны. Это влияет на отображение углов дальнего поля и возможные результаты цветовой шкалы. Это также влияет на фазы результатов дальнего поля, но не на модули.

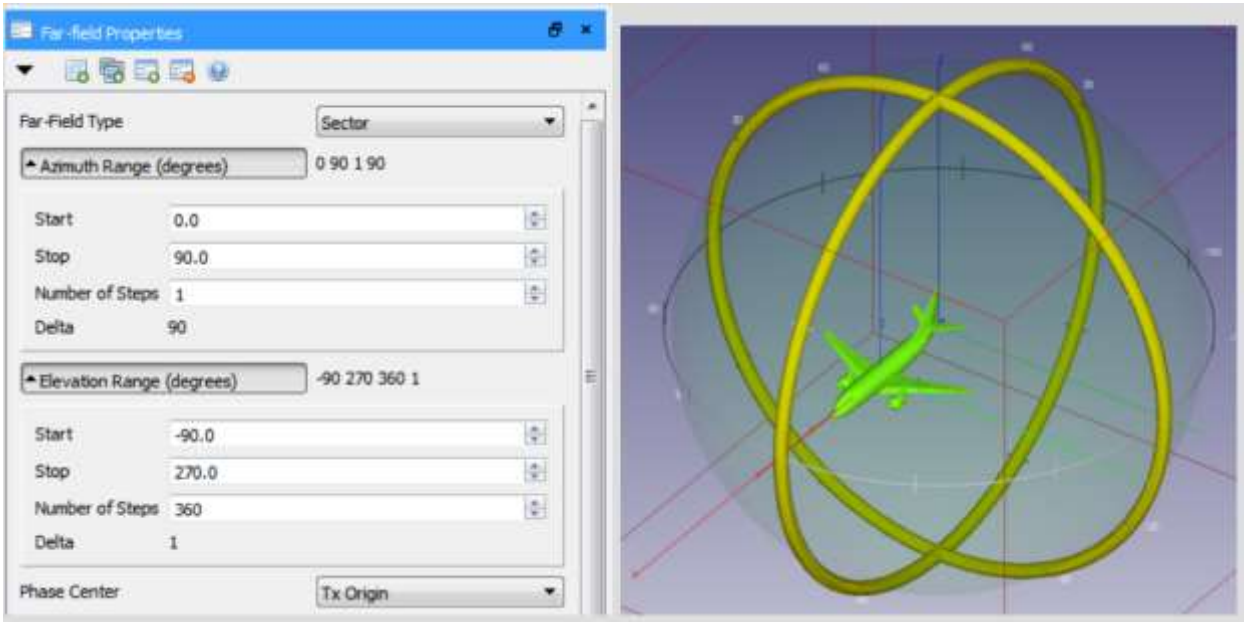


Рис.12.40. Задание точек расчета ДН

Выберите узел *Methodology* (рис. 12.41). Установите плотность лучей на длину волны *Ray Density* = 2 (per wavelength), максимальное число отражений лучей (Max Number of Bounces) =5.

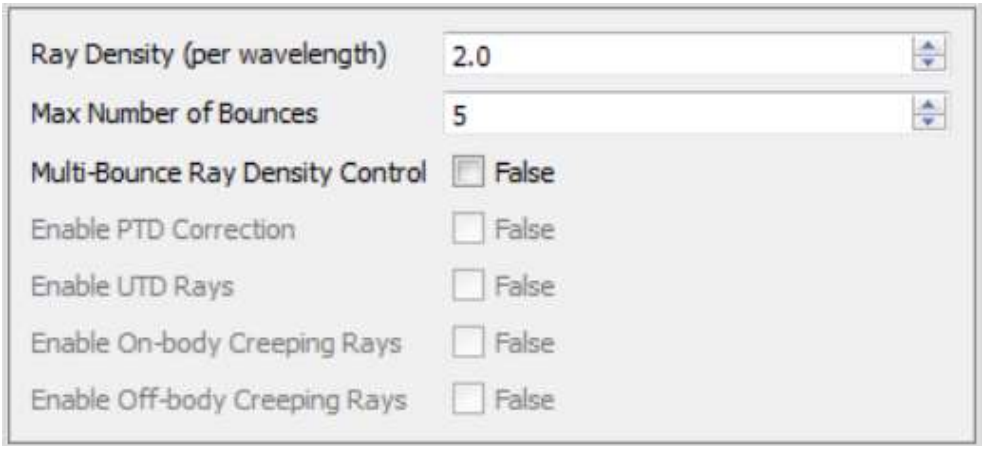


Рис. 12.41. Выбор опций метода расчета

Выберите ***Run and Save*** из меню ***Run***. Расчет должен завершиться в течение нескольких минут (или нескольких секунд, если включен ***GPU***). В цветовой шкале появятся маркеры угла дальнего поля (рис. 12.42).

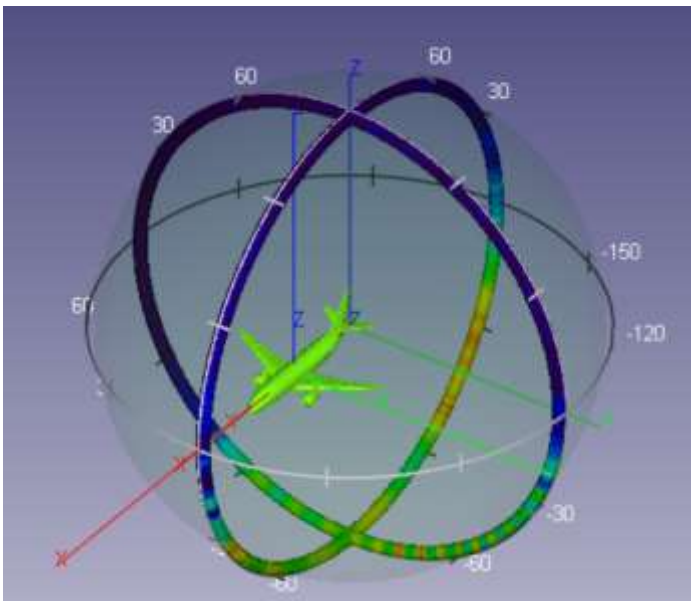


Рис. 12.42. 3D диаграмма направленности излучения щелевой антенны

Разверните узел ***CavityBackedSlot_LP***. Включите опцию ***visibility*** в узле ***Pattern***.

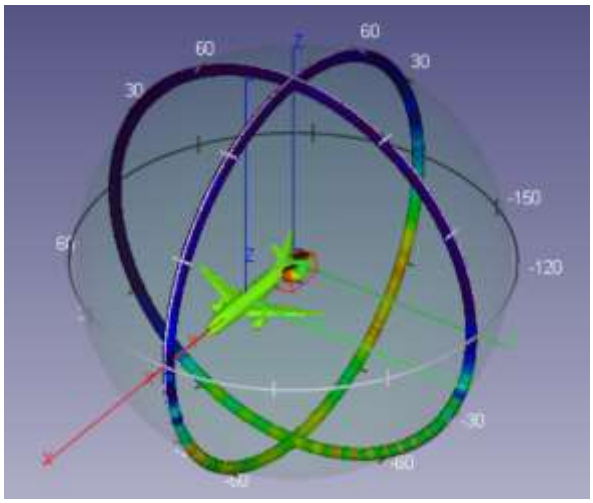


Рис. 12.43. Расцвета маркеров дальнего поля после расчета

Выберите узел ***Far-Field*** под узлом ***Results***. Кликните кнопку ***Polar Plot*** выше панели свойств. Установите ***Scale*** на ***Decibel***, а ***Polarization*** на ***Composite***. (рис. 12.44).

Выберите узел ***Polar Plot***. Установите имя ***Title*** как "***AZ*** = 0". Установите границы ***Radial Min*** = *-40 (dB)*, ***Radial Max***= 10 (dB).

Включите ***Lock Axes***. Это устанавливает границ оси как на последнем шаге, когда добавлялась вторая характеристика. В противном случае они могут обновляться автоматически и должны быть настроены снова.

Разверните папку панели ***Display CAD Overlay***. Увеличите ***Overlay Size (% of Plot)*** до величины около 80. Ваши результаты могут немного отличаться из-за неточного расположения антенны, выполненного на шаге 4.

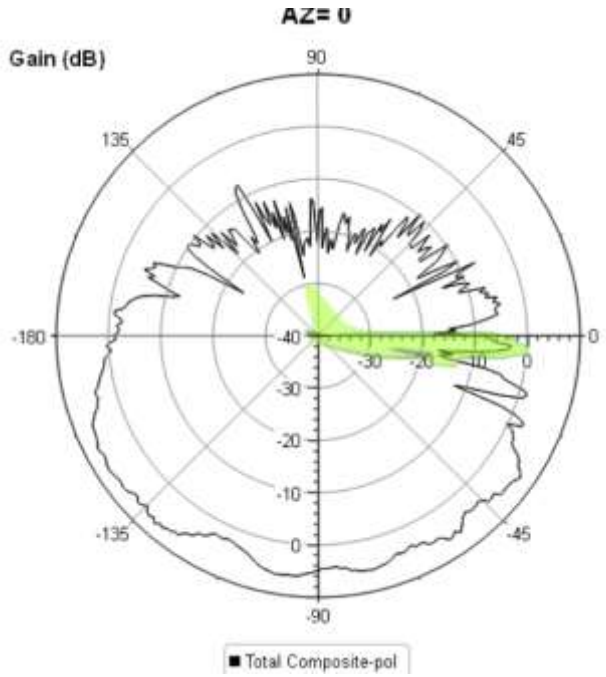


Рис. 12.44. ДН антенны на корпусе самолета в экваториальной плоскости

Протащите узел ***Far-Field*** на графическое окно, чтобы создать второй узел ***Plot-Trace*** на графике в полярной системе координат. В этом новом узле ***Plot Trace***, установите ***Result Component*** как ***Incident Field (Ground Plane)***.

В полярной системе координат ДН установленного и отдельно стоящего резонаторного бокса показаны вместе, для сравнения. ДН свободно расположенной антенны включает влияние заземления, поэтому он излучает только в нижнее полупространство (рис. 12.45).

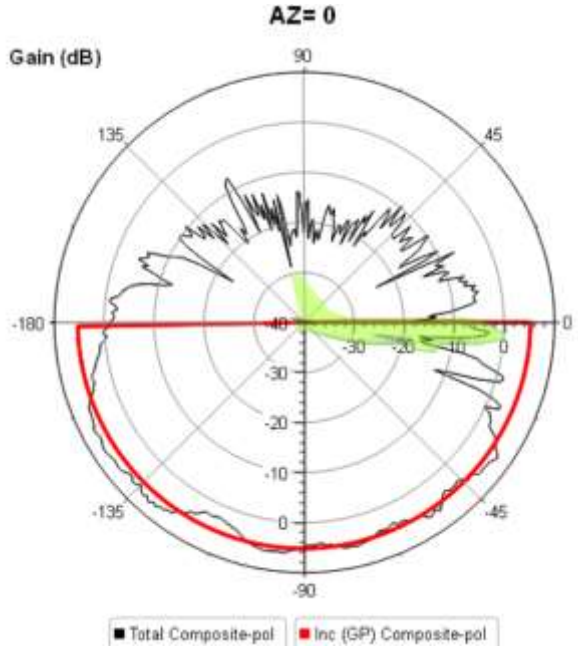


Рис. 12.45. ДН щелевой антенны и антенны, установленной на самолете

Вид теперь соответствует графику в полярной системе координат.

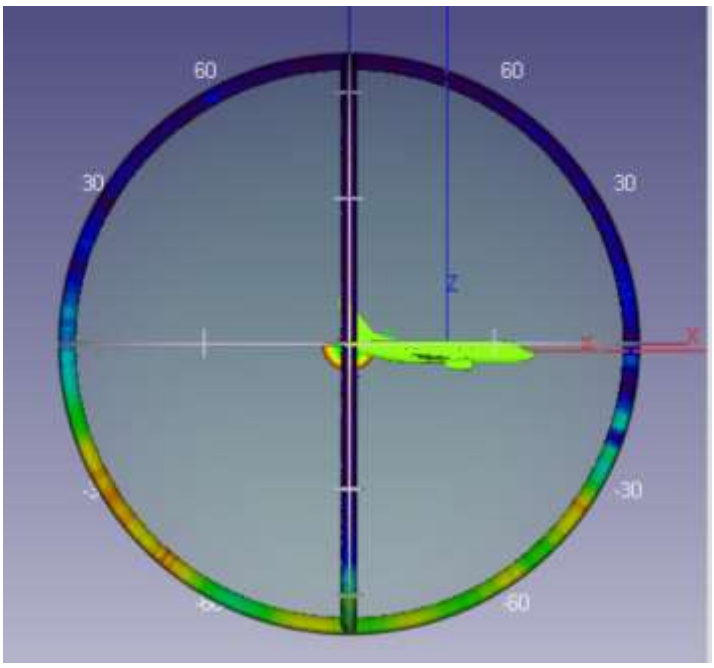


Рис. 12.46. Рассчитанные ДН излучения антенны на стабилизаторе самолета

Выберите узел ***Polar Plot:Total Composite-pol***. Включите ***Link Changes***. В результате будущие изменения в узле ***Plot Trace*** будут применены ко всем другим узлам ***Plot Trace*** в этом окне. Это свойство изменяется в текущем узле ***Plot Trace***, чтобы примениться ко всем другим узлам ***Plot Trace*** в этом графическом окне.

Установите ***Azimuth*** на угол 90°. Выберите узел ***Polar Plot***. Установите название графика ***Title*** как "***AZ*** = 90^{0}". Это есть сечение ДН для ***AZ*** = 90° (рис. 12.47).

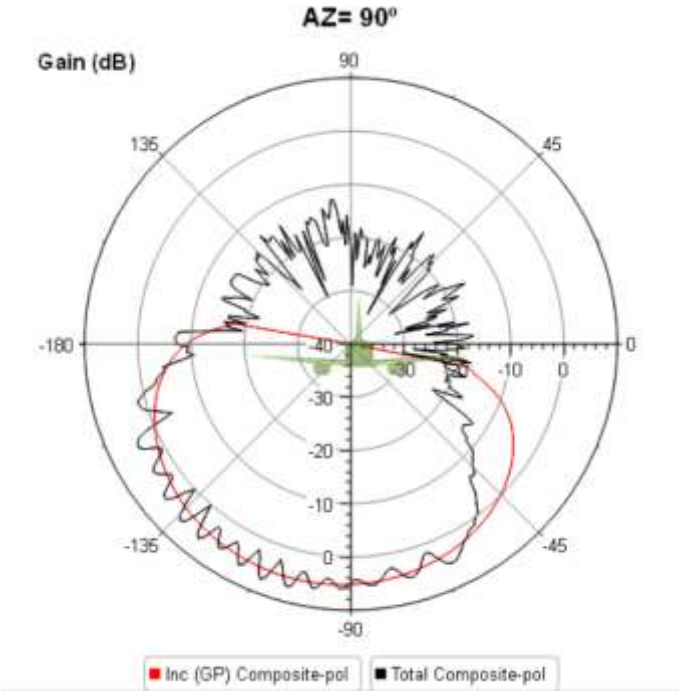


Рис. 12.47. ДН в азимутальном сечении

Кликните кнопку ***Back View*** в окне ***3D – Scene***. Этот вид теперь соответствует полярному графику.

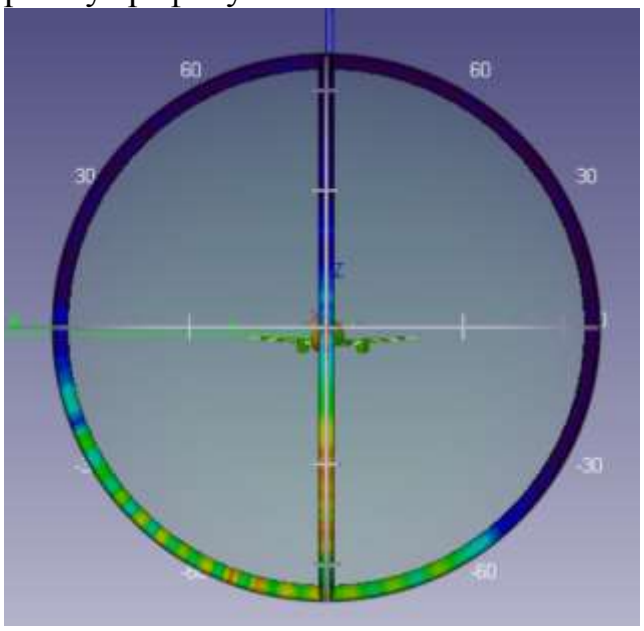


Рис. 12.48. 2D ДН соответствующая полярному графику

12.5 Создание нового проекта Savant и вставка щелевой антенны

12.5.1 Загрузка CAD модели цилиндра с полусферическими окончаниями

Кликните кнопку ***New Project*** в главном меню. Кликните кнопку ***Add CAD...*** Откройте ***Tutorial10/cyl_sphereCaps.igs***.

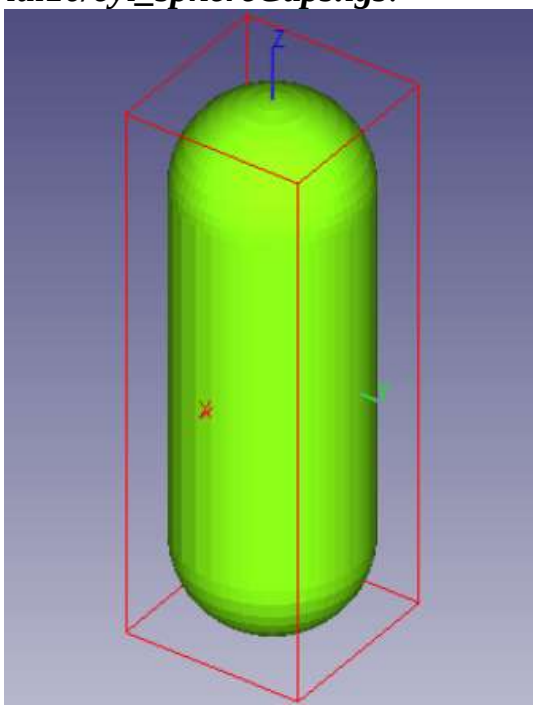


Рис. 12.49. Модель цилиндра

Выберите узел ***cyl_sphereCaps***. Разверните папку панели ***Bounding Box***. Цилиндр имеет радиус 0.1507 м и высоту 0.6 м. С полусферическими окончаниями, общая высота структуры равна 0.9 м. (рис. 12.50).

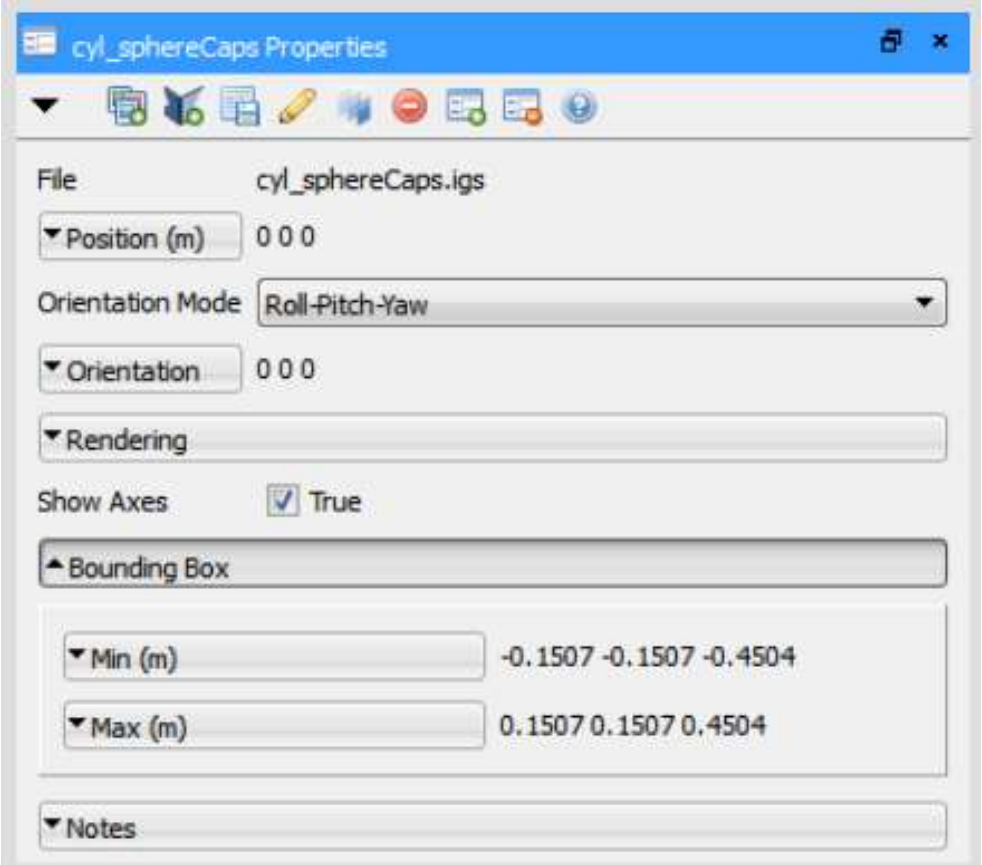


Рис. 12.50. Параметры цилиндра

12.5.2 Загрузка экспортируемого проекта с ближним полем NF для щелевой антенны в экранированном боксе

Кликните ***Add Near Field Antenna...*** в главном меню. Найдите директорию, которая содержит папку ***CavityBacked_Slot_4GHz.hfssnf*** и откройте ее.

В этот момент щель с полостью находится внутри цилиндра, поэтому Вы не увидите его в окне 3D-сцены. Отключите видимость узла ***cyl_sphereCaps***, чтобы можно было видеть щель с полостью (рис. 12.51).

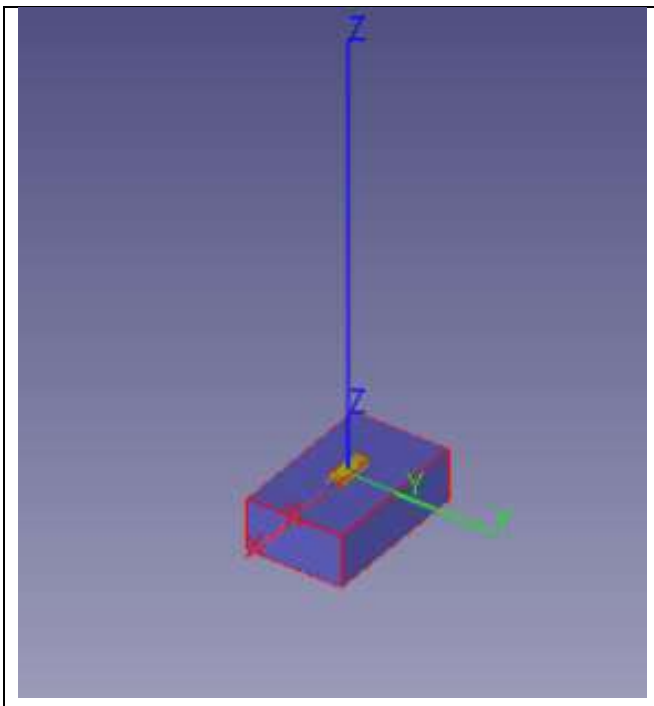


Рис. 12.51. Щелевая антенна

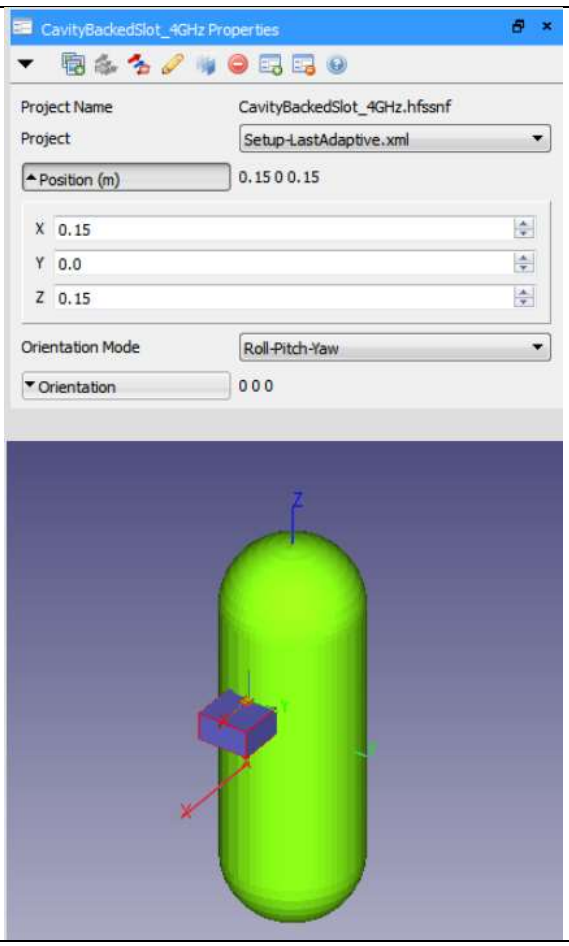


Рис. 12.52. Щелевая антенна на поверхности цилиндра

Включите снова видимость ***cyl_sphereCaps***.

12.5.3 Вставка щелевой антенны в корпусе на верхней половине цилиндра

Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***. Разверните папку панели ***Position***. Установок ***Relative Position*** и ***Relative Orientation*** сейчас не имеется, потому что мы не имеем интерактивной точки размещения антенны на поверхности (рис. 12.52). Установите ***Position to (X,Y,Z)*** = (0.15, 0, 0.15) м.

12.6 Ориентация антенны

Антенна будет ориентирована таким образом, чтобы щель была выровнена по окружности вдоль поверхности цилиндра (т.е. перпендикулярно оси цилиндра). В этой ориентации, щель излучает в направлении +X и с вертикальной поляризацией.

Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***. Разверните папку ***Orientation***. Установите ***Orientation* to (*Roll*, *Pitch*, *Yaw*)** = (0,-90,90) (***deg***). Из-за

искривленной поверхности, полость замкнутого резонатора направляется от поверхности цилиндра.

Разверните узел ***CavityBackedSlot_LP*** и выберите узел ***Ground Planes.*** Кликните кнопку ***Add Near Field Ground Plane*** сверху панели свойств. Создается новый узел ***Ground Plane***. Как и раньше, его не нужно использовать для конфигурирования для корректной роботы для этой антенны.

Сохраните проект в директории ***Tutorial10*** как ***cylinder-cbs.savant***.

12.7 Согласование плоской щели с кривизной цилиндра

Для согласования плоской щели с искривленной поверхностью цилиндра выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***. Установите ***Field Sample Density*** = *8* (per λ) (рис. 12.53).

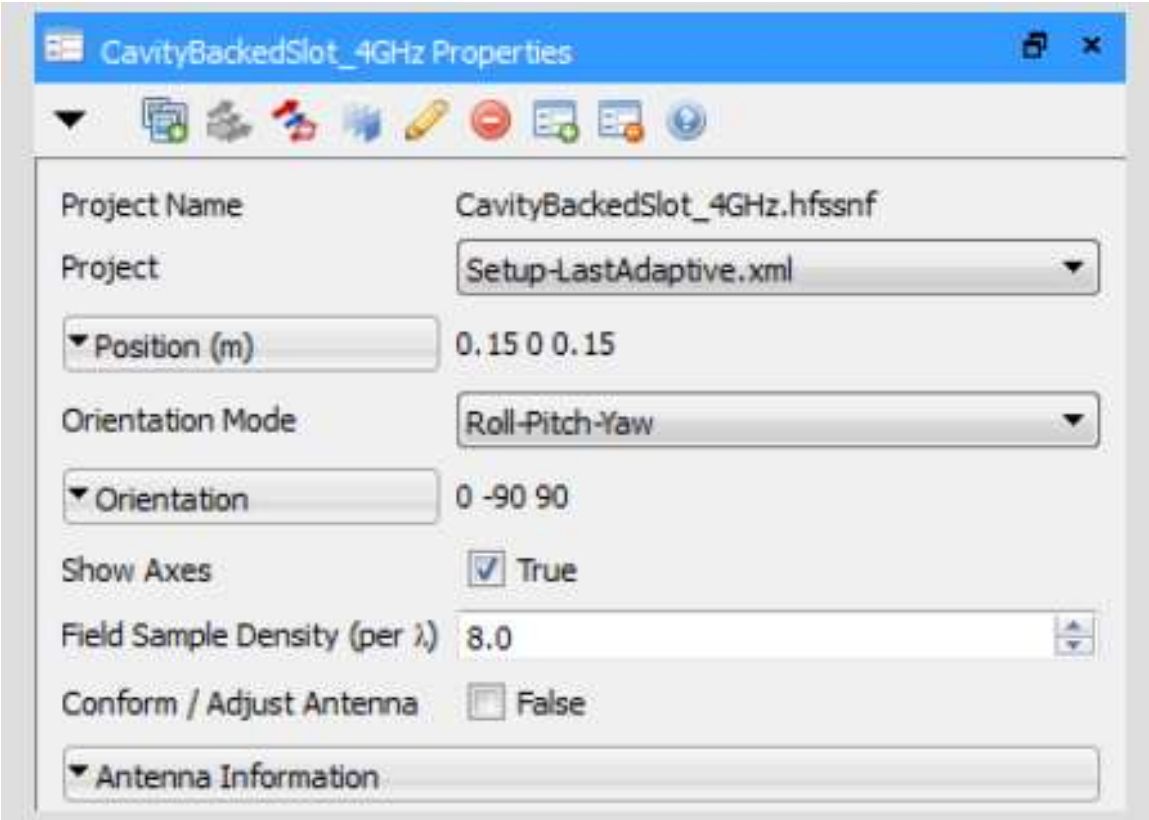


Рис. 12.53.Установки характеристик поверхности

Кликните правой кнопкой на узел ***CavityBackedSlot_LP*** и выберите ***Generate Current Sources***. Кликните ***Zoom to Node*** в линейке ***3D - Scene*** и затем увеличьте немного больше.

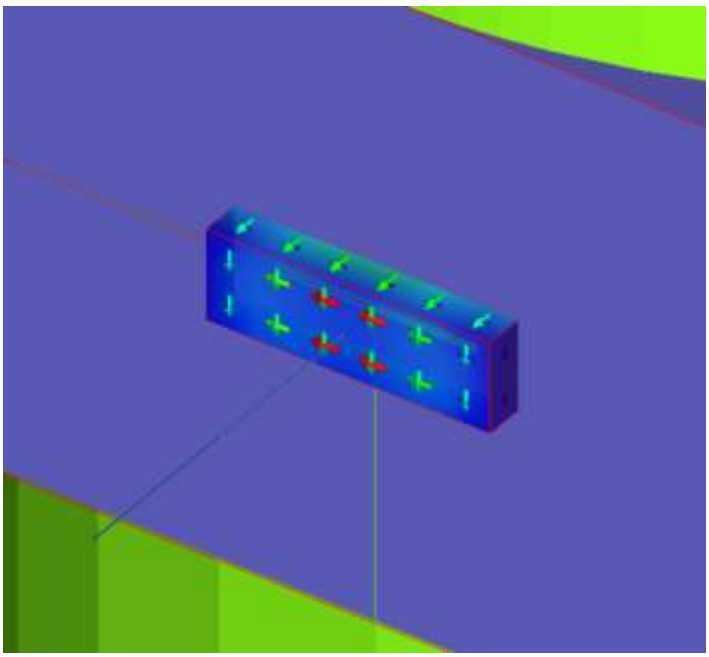


Рис. 12.54. Источники тока на поверхности щелевой антенны

Отключите видимость следующих дочерних узлов ***CavityBackedSlot_LP***:

- ***Near Field CAD Model***
- ***Current Density***
- ***Ground Plane***

Кликните кнопку ***Bottom View*** в окне ***3D - Scene***. Установите узел ***CavityBackedSlot_LP***.

Кликните ***Zoom to Node*** в ***3D - Scene*** и увеличьте далее источники тока. Они расположены плоско по отношению к изогнутой поверхности (рис. 12.55). Это связано с тем, что импортированная модель антенны предназначена для плоской щели в земляной плоскости.

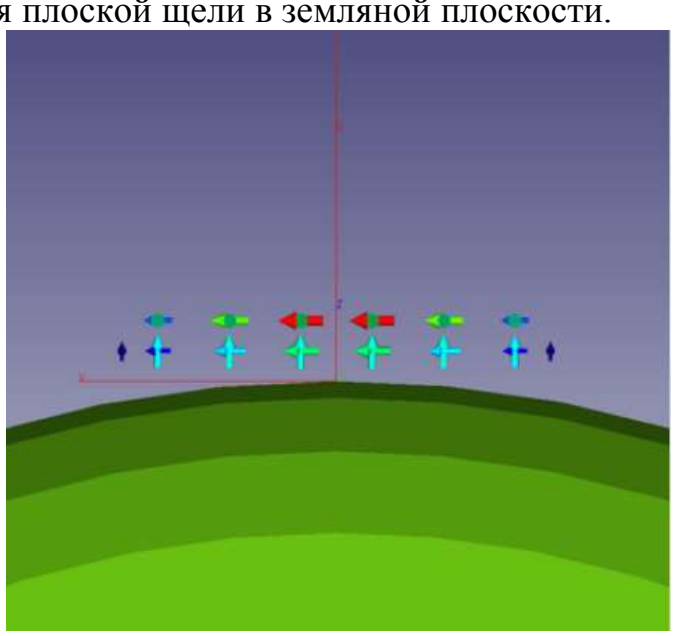


Рис. 12.55. Источник и изогнутая поверхность цилиндра

Выберите узел ***CavityBackedSlot_LP***. Переключите на ***Conform/Adjust Antenna***. Вы можете заметить несколько коротких индикатор активности в этот и следующие шаги. ***Savant*** регенерирует источники тока, включая эффекты этих новых установок.

Установите селектор ***Conform to Platform*** на ***Along Normal***. Ориентация источников тока подстраивается так, что они остаются тангенциальными к лежащей поверхности (рис. 12.56).

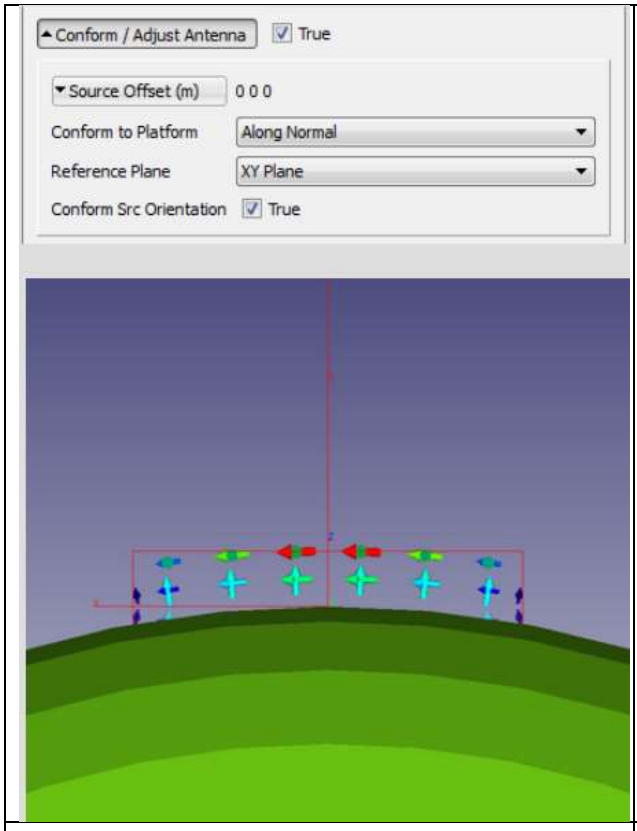


Рис.12.56. Источники тока на искривленной поверхности

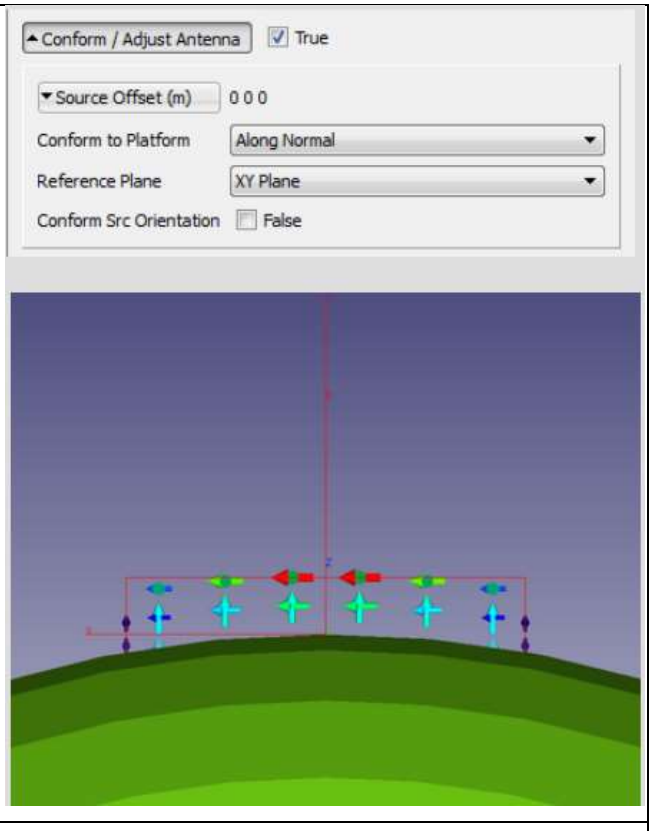


Рис. 12.57. Коррекция источников на искривленной поверхности

Снимая опцию ***Conform Src Orientation*** высоты источников тока корректируются в соответствии с кривизной поверхности, но не с их ориентацией (рис. 12.57).

Снова включите опцию ***Conform Src Orientation***. Задайте команду ***Default View***. Вид антенны на цилиндре показан на рис. 12.58.

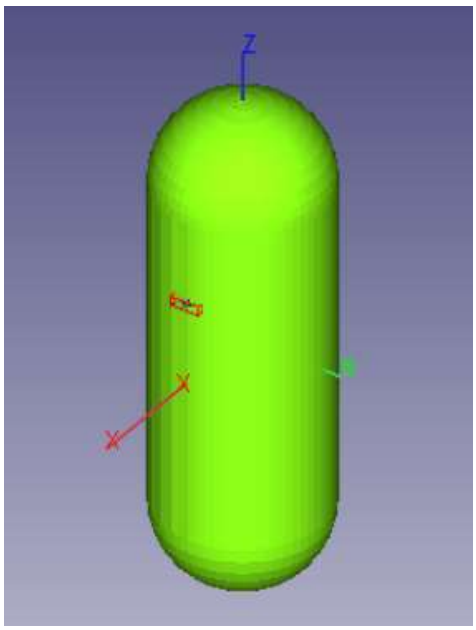


Рис. 12.58. Вид щелевой антенны на искривленной поверхности

Итак, мы моделируем слегка искаженный вариант щелевой антенны с резонансной полостью. Невозможно сделать щель изогнутой. Поэтому или стенки должны быть укорочены, чтобы приспособить их к кривизне, или дно полости должно быть изогнутым. Не так просто создать модель с такими адаптациями, а поле выборки всегда прямоугольная коробка. Вместо этого мы моделируем антенну, как если бы она была плоской, а затем меняем геометрию источников тока, чтобы имитировать изогнутую щель. Это нормально, пока искривление не слишком велико. Это приближение, но опять же, моделирование щели в бесконечной земляной плоскости также является приближением, когда она фактически установлена в конечной структуре. Мы предполагаем, что эти изменения существенно не нарушают распределение полей в щели и эквивалентный ток используется для представления его излучения.

12.8 Расчет ДН дальнего поля используя опцию ползущих волн

Выберите узел ***Analysis***. Установите ***Analysis Type*** на ***Far-field Pattern***. Установите ***Tx Antenna*** на ***CavityBackedSlot_LP***.

Выберите узел ***Analysis:Frequency***. Установите частоту анализа 4 GHz. Выберите узел ***Far-Field*** и установите ***Far-field Type*** на ***Azimuth/Elevation Cut***. Установите ***Azimuth Range***: ***Start*** = *-180°*, ***Stop*** = *180°*, ***Number of Steps*** = *360*. Установите ***Elevation Range***: ***Start*** = *-180°*, ***Stop*** = *180°*, ***Number of Steps*** = *360*. Установите фазовый центр ***Phase Center*** *на* ***Tx Origin*** (рис. 12.59).

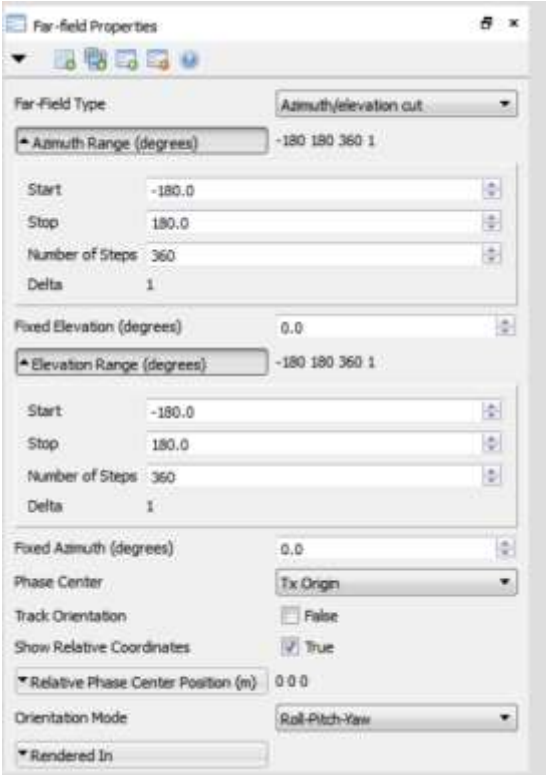


Рис. 12.59. Выбор опций расчета сечений ДН

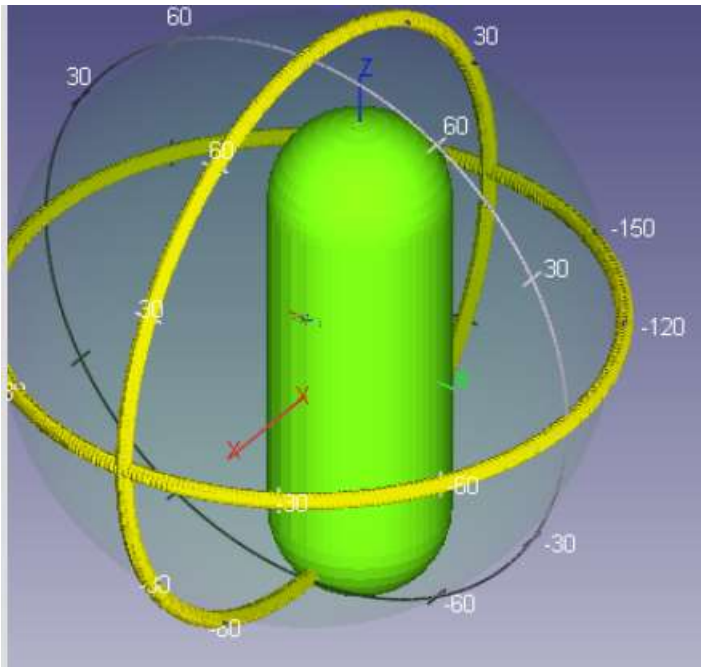


Рис. 12.60. Задание углов на расчет щелевой антенны на цилиндре

Выберите узел ***Analysis:Methodology***. Установите ***Ray Density*** (***per wavelength***) = 8. Включите ***Enable Creeping Rays***. Узел ***Creeping Wave*** создается и выбирается под узлом ***Methodology***.

Убедитесь, что волны соскальзывания установлены, как показано на рис. 12.61.

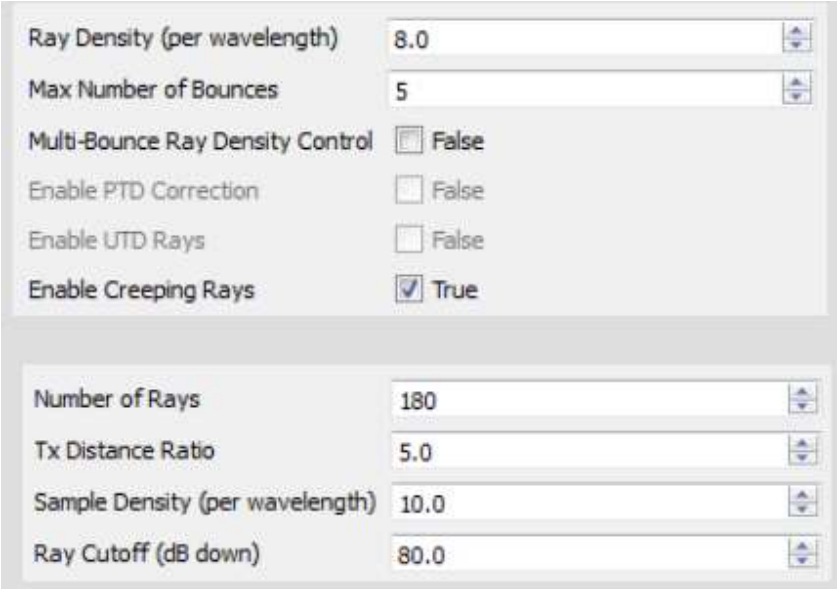


Рис. 12.61. Установка режима ползучих волн

Выберите ***Run and Save*** из меню ***Run***. Расчет потребует несколько минут, или около минуты с ***GPU***-ускорением. По завершении, в цветовой шкале появятся маркеры углов дальнего поля (рис. 12.62).

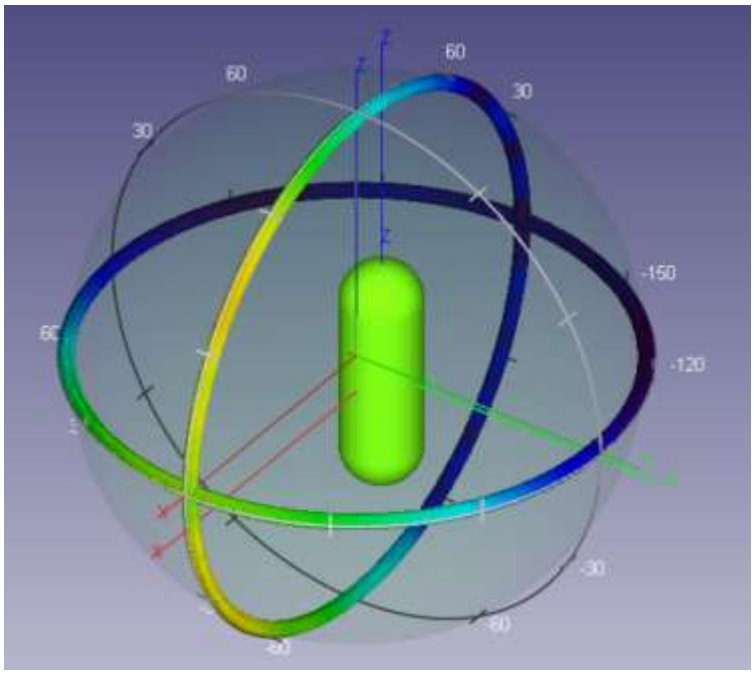


Рис. 12.62. Расцветка ДН, показывающая излучение антенны

Выберите узел ***Results***: ***Far-Field***. Создайте ***Polar Plot***. Установите ***Scale*** на ***Decibel***, и ***Polarization*** на ***Composite***.

Установите ***Domain*** как ***Elevation***. Выберите узел ***Polar Plot***.
Установите название графика "***Vertical Cut AZ = 0: Broadside to Slot***". Установите ***Radial Min, Max*** равными -30, 10 (dB). Переключитесь на ***Display CAD Overlay*** (рис. 12.63).

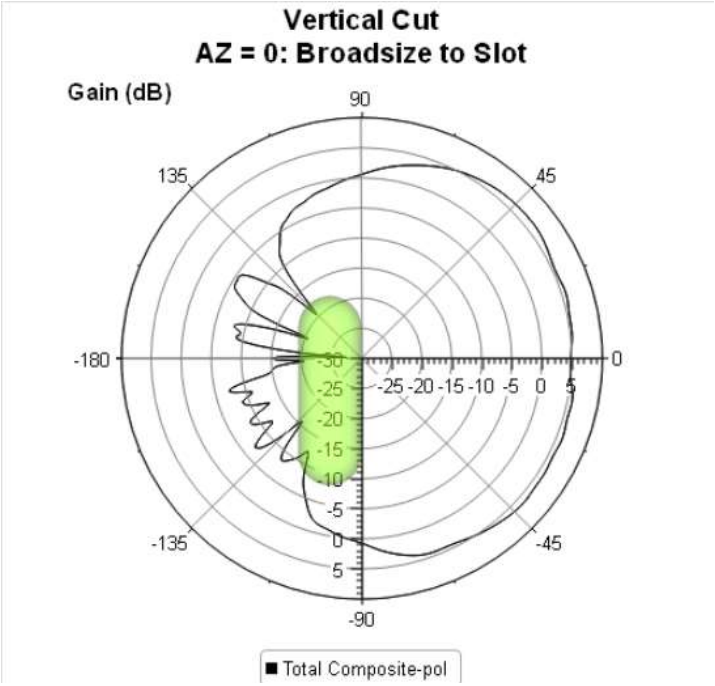


Рис. 12.63. Сечение ДН в азимутальной плоскости

Кликните ***Total Composite-pol*** в окне легенды ***Polar Plot***.
Установите ***Domain*** как ***Azimuth***. Выберите узел ***Polar Plot***.
Установите текст на "***Horizontal Cut EL = 0: Broadside to Slot***".
Установите ***Radial Min, Max*** на значения -35, 10 (dB), рис. 12.64.

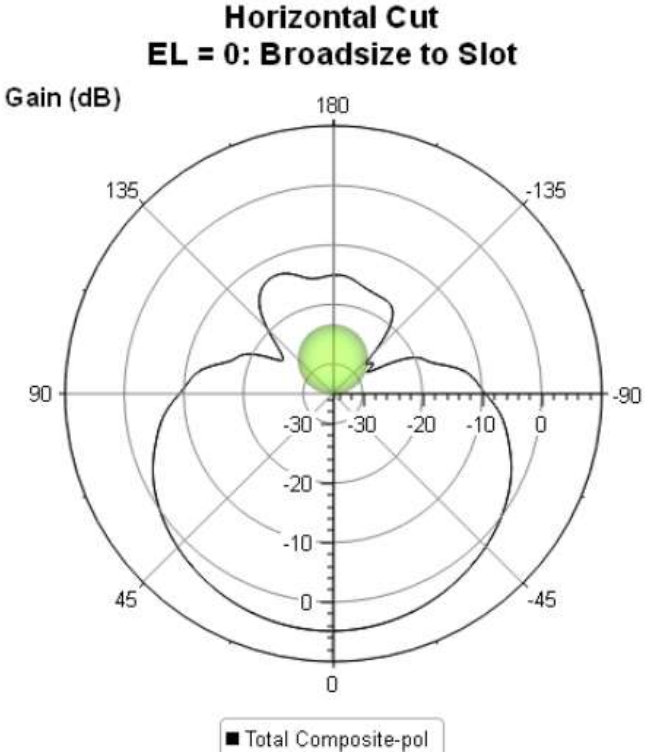


Рис. 12.64. Сечение ДН антенны на корпусе

13 РАБОТА ПРОГРАММЫ В РЕЖИМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В этом разделе показываются возможности инструмента ***Multi-Run Sequence***. Будет использоваться ранее изученный Пример 3. Настроим его для расчета в режиме последовательности запусков.

В результате расчета можно на один график нанести несколько решений, каждый для пошагового измененного параметра. Эти изменения можно видеть также на 3D графиках и сценах.

Как только результаты получены, можно будет анализировать эти результаты с помощью инструмента изменения параметров. В заключении можно увидеть и запустить анимацию (и записать видео) результатов в 3D-сцене. Пользователь также сможет создавать эпюры из полученных результатов (рис. 13.1).

Выполним следующие шаги примера:

1. Загрузка и конфигурирование существующего проекта;
2. Конфигурация свойств ***Multi-Run Sequence*;**
3. Получение результатов в ***3D-Scene***;
4. Вывод результатов на график.
5.

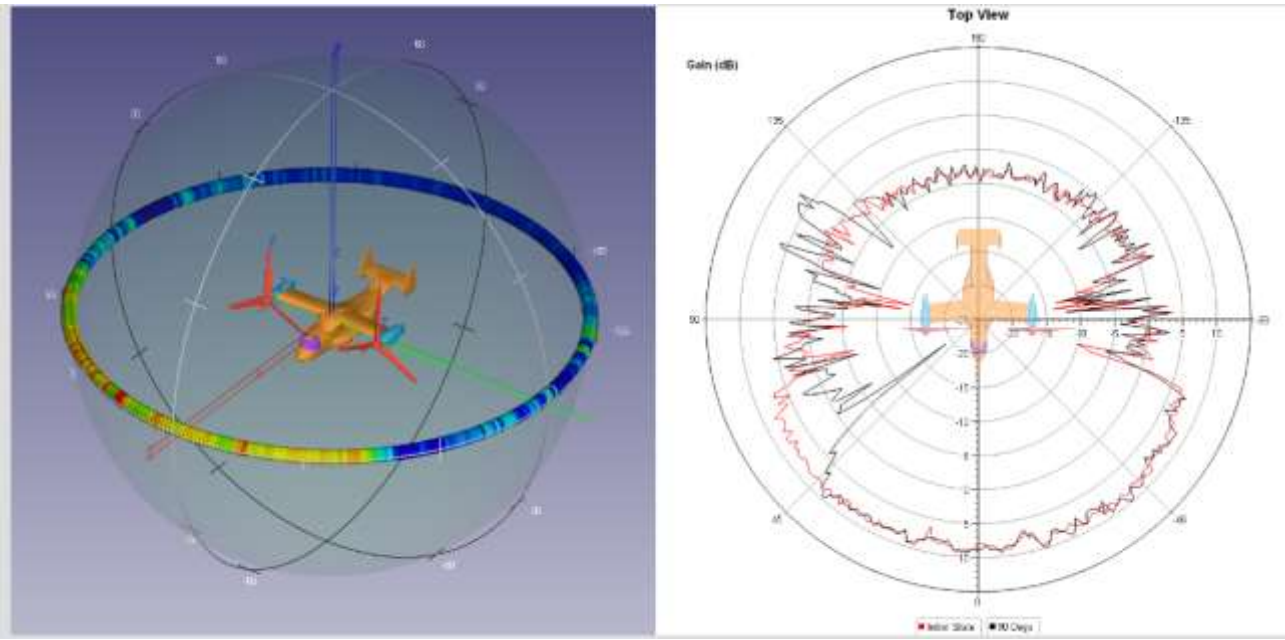


Рис. 13.1. ДН в азимутальной плоскости для двух положений винтов

Этот пример использует файлы, расположенные в директориях ***Tutorial3*** и ***Tutorial11***.

Запустите ***Savant*** и в директории ***Tutorial3\Finished*** откройте проект ***Tutorial3_2.savant***. Будет загружен проект ***Tutorial 3*** (рис. 13.2).

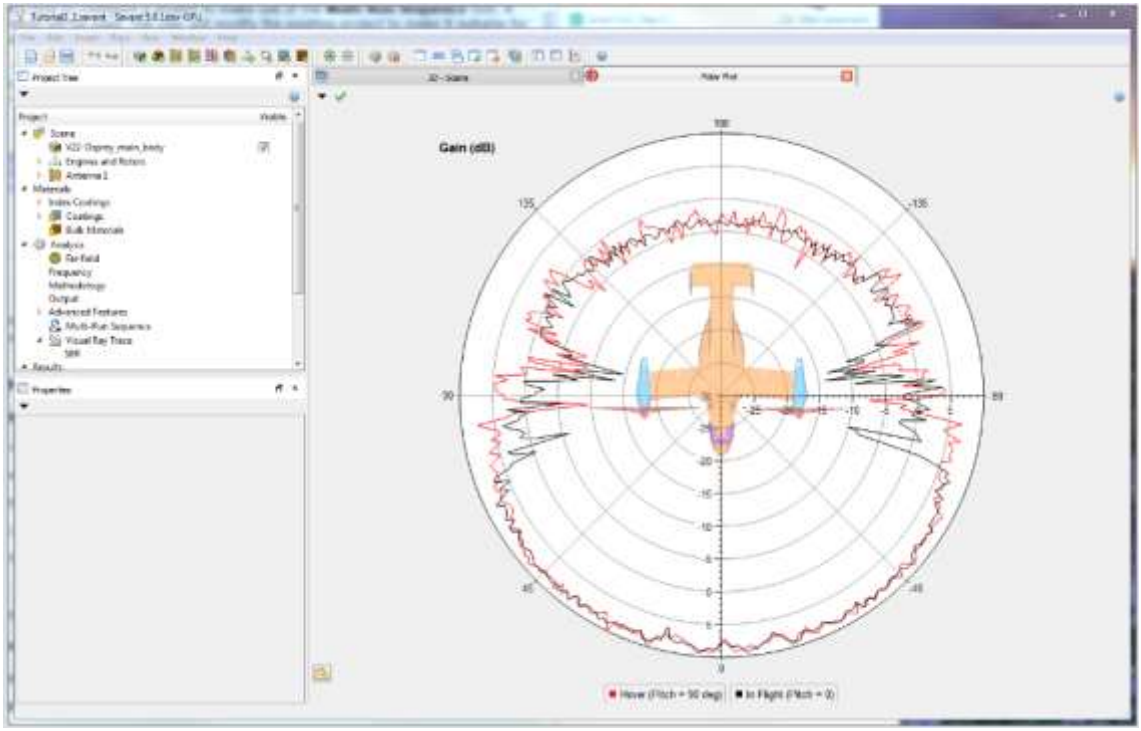


Рис. 13.2. Сечение ДН для нескольких переменных

Очистите проект для удаления ненужных установок и конфигураций из проекта ***Tutorial 3*** (рис. 13.3). Закройте окно ***Polar Plot***.

Удалите существующие результаты. Удалите узел ***Imported Results: engines_90_deg*** и отключите окно визуализации ***Windows: 3D - Scene: Far-Field***.

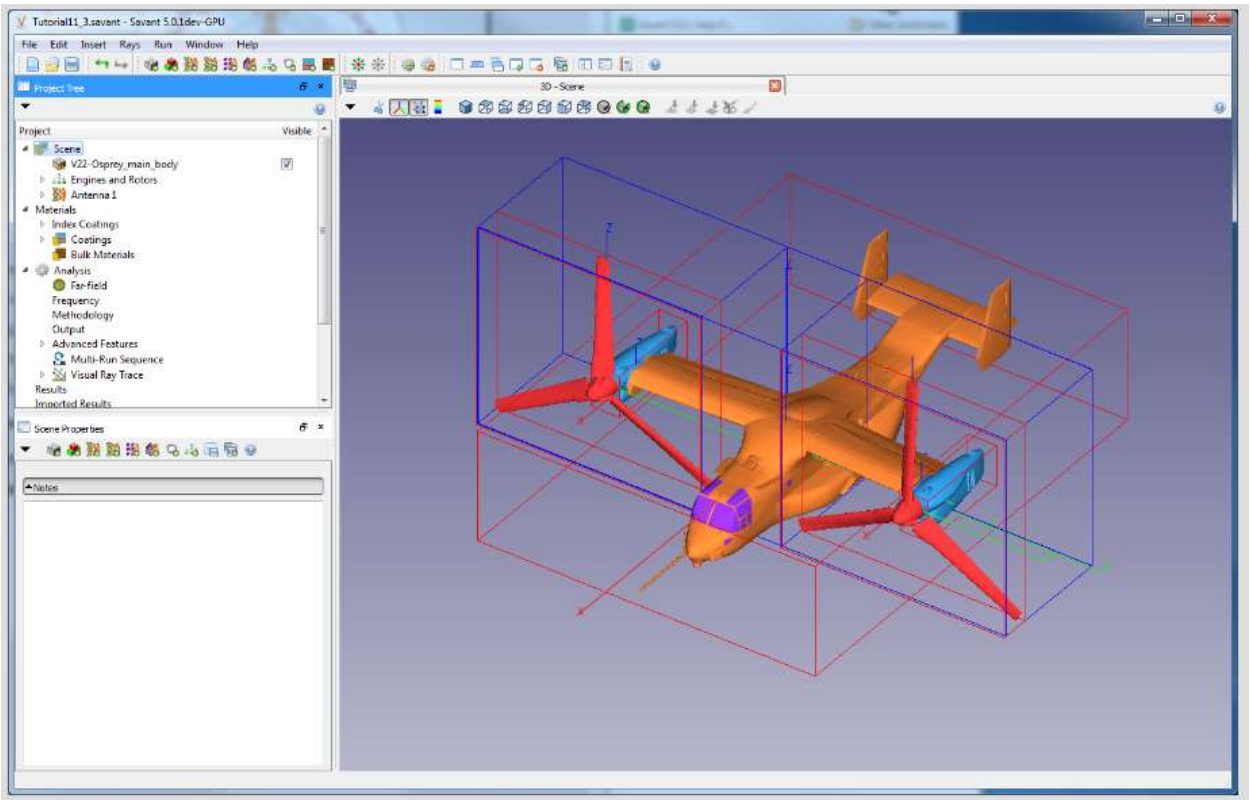


Рис. 13.3. Загрузка модели самолета с вращающимися винтами

Сохраните проект командой ***Save Project as...*** в директории ***Tutorial11*** под именем ***Tutorial11***.

13.1 Настройка многошагового проекта

Функция ***Multi-Run sequence*** позволяет создавать переменные из различных свойств в существующих узлах сцены, а затем последовательно запускать проект с различными значениями, назначенными переменной. С помощью переменной можно изменять:

- Положение;
- Ориентацию;
- Резонансную частоту;
- Положения антенны передатчика ***Tx*** и приемника ***Rx***;
- Плотность луча;
- Максимальное число пучков ***Max Number of Bounces***.

В Примере 3 было показано, как изменять положение и ориентацию CAD объектов в сцене. Здесь мы создадим переменные для модификации ориентации из узлов CAD и узлы Scene Group и будем использовать много-параметрический запуск на расчет.

13.2 Добавление переменных в последовательность Multi-Run

Выберем узел ***rotor_blade_starboard***. Разверните папку ***Orientation*** в панели свойств узлов. Затем установите величину ***Roll = 90.0***. Винт будет вращаться в сцене *3D - Scene* при изменении величины угла, вводимого в панели свойств (рис. 13.4).

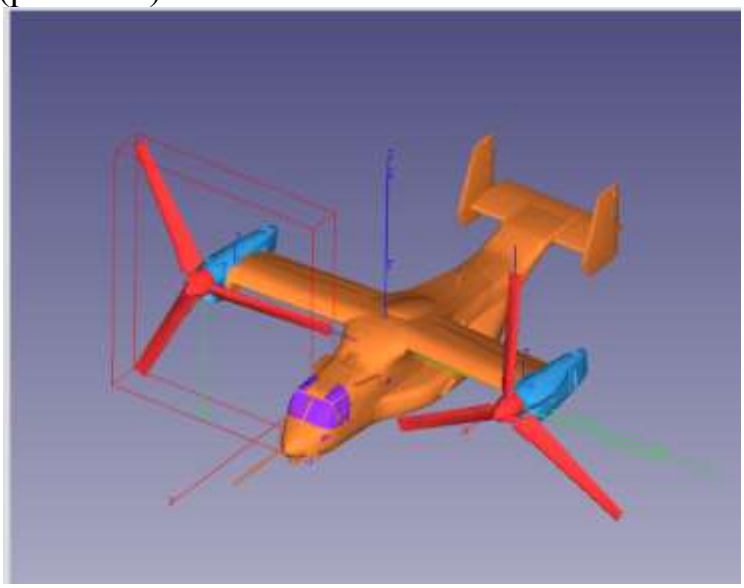


Рис. 13.4. Модель самолета с вращающимися винтами

Установите величину ***Roll*** снова на значение *0.0*. Прокрутите ***Scene Tree***, и найдите узел ***Multi-Run Sequence***.

Наведите курсор мыши на метку: ***Roll, Pitch, Yaw*** (Крен, Тангаж, Рыскание). Теперь щелкните левой кнопкой мыши и перетащите указатель мыши, чтобы он достиг узла ***Multi-Run Sequence***. При перемещении значок указателя содержит новый символ, похожий на знак блокировки. Знак исчезнет, когда он достигнет узла ***Multi-Run Sequence***. Это означает, что будет введена переменная.

Новый узел ***Variable1*** появится под ***Multi-Run Sequence***. Выберите этот вновь созданный узел (рис. 13.5).

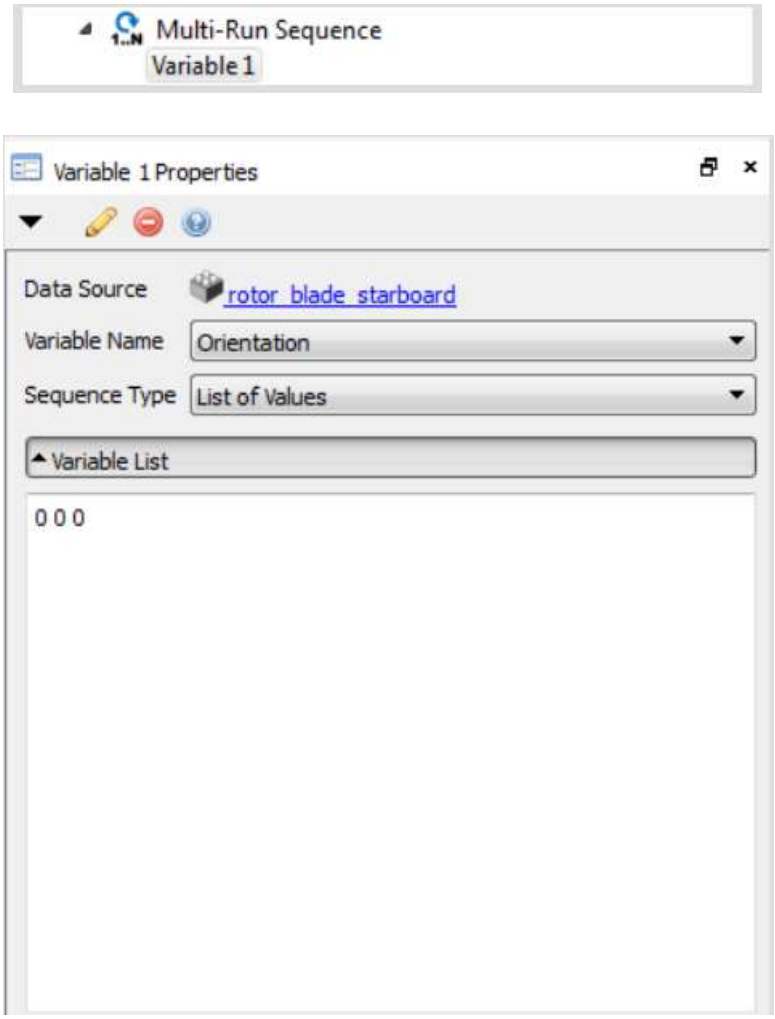


Рис. 13.5. Список значений переменной в диалоге её свойств

Рассмотрите панель свойств. Он состоит из следующих элементов:

Data Source - узел *данных*, в котором применяются переменные;
Variable Name - список модифицированных переменных возможных для текущих **Data Source** (положение, ориентация, и др.);
Sequence Type определяет модификации последовательности данных;

Variable List -список величин, которые будут повторяться. Их можно впечатывать или модифицировать прямо в таблице.

Формат данных должен быть выбран, когда пользователь вводит данные вручную.

Замечание: Эта панель свойств представляет ***Sequence Type*: *List of Values*** который применяется к ***Variable Name*: *Orientation***. Некоторые переменные использую различные ***Sequence Type*** с различными панелями.

Запишите следующий список в ***Variable List*** (углы поворота винта)

- 0 0 0
- 30 0 0
- 60 0 0
- 90 0 0
- 120 0 0
- 150 0 0
- 180 0 0
- 210 0 0
- 230 0 0
- 250 0 0
- 280 0 0
- 310 0 0
- 330 0 0

Повторите этот шаг для узла ***rotor_blade_port***. Новая переменная ***Variable 2*** появится в узле ***Multi-Run Sequence***.

Выберите узел ***Multi-Run Sequence***. Раскройте папку ***Multi-Run Sequence Steps*.**

Можно увидеть итерацию вложенного цикла для каждого из значений введенных переменных. В данном случае мы хотим, чтобы роторы вращались синхронно. Это может быть достигнуто за счет использования группы переменных. Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Multi-Run Sequence*** и выберите действие ***Add Sequence Group***. Добавится новый узел ***Group 1***.

Перетащите ***Variable 1*** и ***Variable 2*** в созданный узел ***Group 1*.** Теперь выберите снова узел ***Multi-Run Sequence*** и отметьте величины, которые вы подвергаете итерациям. Оба винта будут вращаться синхронно.

13.2.1 Создание движения с различными величинами переменными

Выберите узел ***Multi-Run Sequence***. Раскройте папку ***Animate Sequence***. Здесь имеются тип анимации ***Animation Type*** и скорость смены рамок ***Frame Rate (FPS)***. Выберите ***Live*** и *1.0* (рис. 13.6).

Рис. 13.6. Установка режима изменения переменных в группе

Кликните действие ***Animate Sequence*** и рассмотрите, как винты вращаются в окне сцены (рис. 13.7).

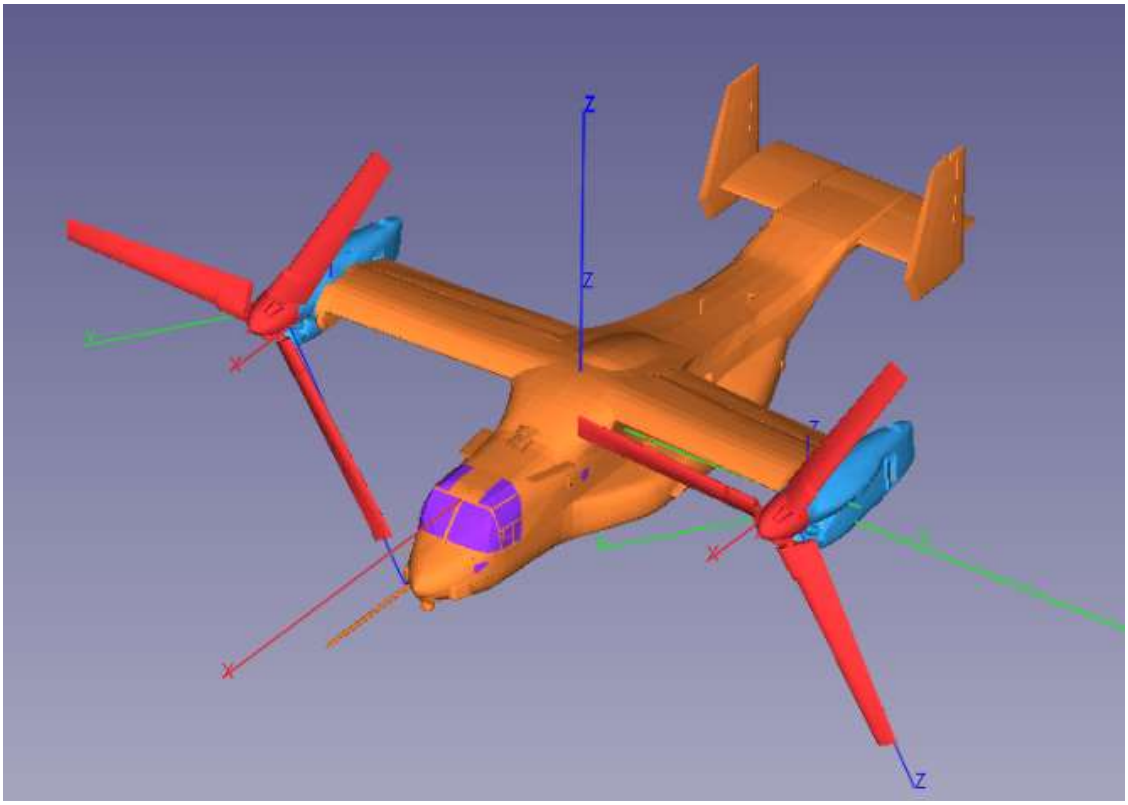


Рис. 13.7. Вращение винтов по команде анимации

Из этих пошаговых рамок можно сделать мультипликацию. Для этого должна быть установлена программа ***Ffmpeg***, и в её пути должна быть установлена системная переменной среды.

Для записи видео, установите в окне ***Animation Type*** опцию ***Record Main Window*** в панели папки ***Animate Sequence*** (рис. 13.8). Затем нажмите кнопку справа от ***Move File***, чтобы открыть файл-браузер и выберите имя выходного файла. После этого, запустите еще раз команду ***Animate Sequence***.

○

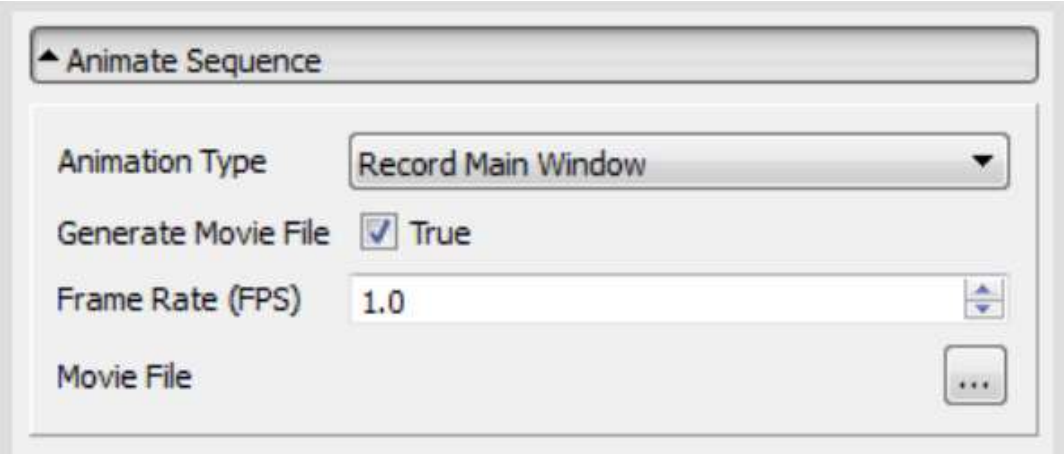


Рис. 13.8. Установка опции записи движущейся сцены

Начальное положение роторов можно вернуть, выбрав первую запись в разделе ***Multi-run Sequence Steps*** в узле ***Multi-Run Sequence***.

13.2.2 Запуск на расчет и вывод результатов в 3D-Scene

Поскольку проект был ранее сконфигурирован в ***Tutorial 3***, то нет необходимости реконфигурировать проект для запуска на расчет. Таким образом, можно запустить моделирование без дополнительной конфигурации:

Выведите вид дальнего поля ***Windows: 3D-Scene: Far-Field***.

Выберите команду ***Run Analysis*** **и** ***Save Project*** после завершения расчета. Убедитесь, что опция ***Use in Simulation*** в узле ***Multi-Run Sequence*** включена.

Теперь Savant будет выполнять моделирование для каждого из значений переменной, показанных в разделе ***Multi-Run Sequence***, и сохранять результаты в новой папке: ***Results:Sequence 1***.

Кроме того, следует отметить, что в отличие от проектов, которые мы видели до сих пор, завершение расчета с многопараметрической последовательностью не переключает ***3D-Scene*** для отображения последних результатов. Это значение по умолчанию для последовательности сценариев многократного запуска на расчет.

Разверните папку ***Results:Sequence 1***. Установка результатов конкретного узла позволяет просмотреть их. Нажмите и перетащите узел **Step _1** к этой ***3D-Scene***. Тогда на одном графике в узле ***Far-Field*** перекрываются результаты с разными положениями винтов.

Это способ показать результаты в 3D-сцене. Новый добавленный узел визуализируется по умолчанию, но это действие не отключает ранее обработанные узлы.

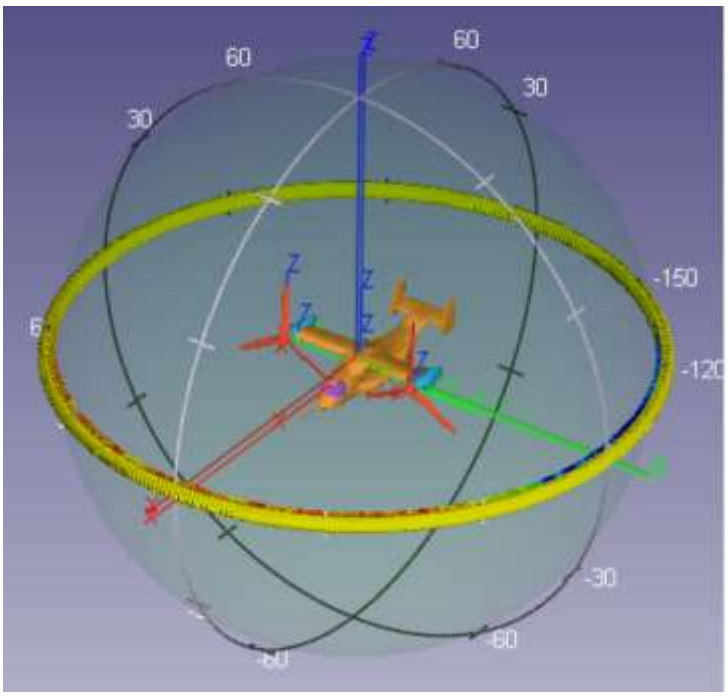


Рис. 13.9. Задание на расчет азимутальной ДН

Внизу дерева проект найдите узел ***Windows*** и разверните его под-узел ***3D - Scene***. Отключите визуализацию ***Windows: 3D - Scene: Far-Field***.

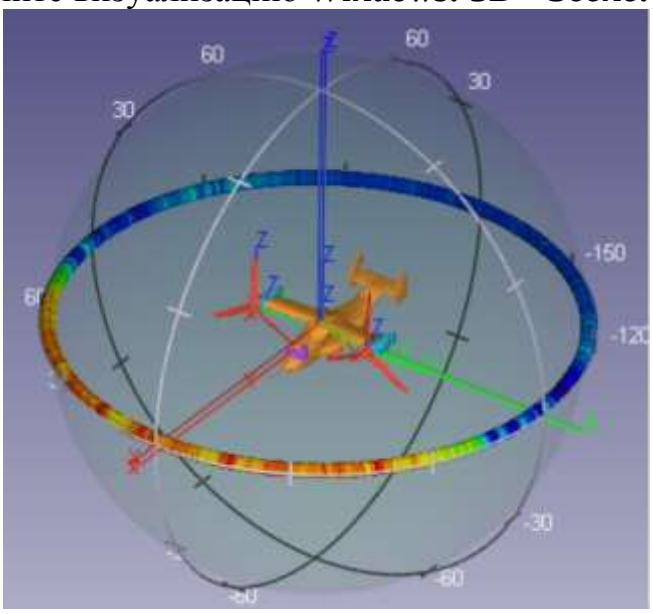


Рис. 13.10. Расцветка круга в соответствии с модулем ДН

Эти результаты перекрываются с полученными в Примере *3*, и можно сравнить результаты.

Отключите визуализацию ***Windows: 3D - Scene: Step_1***. Нажмите и протащите узел **Step _*2*** в сцену ***3D-Scene***. Это даст результаты от ввода второго шага в папке ***Multi-run Sequence Steps*** из узла ***Multi-Run Sequence***.

Выберите второй ввод в таблице ***Multi-run Sequence Steps***. Плоскость будет связана с двумя вращающимися винтами с величинами, показанными в

таблице. Этот тот же самый эффект, который можно достигнуть вводом в список ***Multi-run Sequence*** из узла ***Results:Sequence 1*** (рис. 13.11).

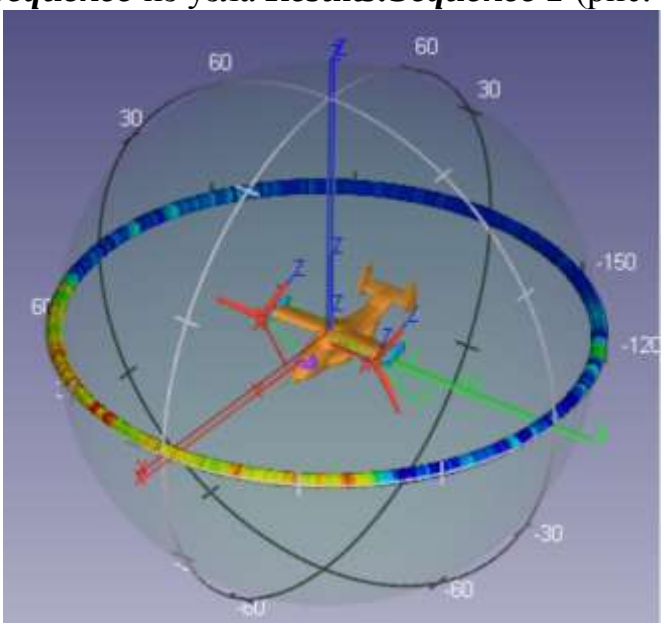


Рис. 13.11. Вращение винтов самолета

13.3 Нанесение результатов на полярную систему координат

Кликните правой кнопкой мыши на узел ***Results:Sequence 1*** и кликните ***Polar Plot.*** Появится новое окно с полярным графиком (рис. 13.12). Установите шкалу **Scale** на ***Decibel***.

Выберите узел ***Polar Plot***, дайте название графика ***Top***. Кликните кнопку ***Lock Axes***. Включите опцию ***Display CAD Overlay***.

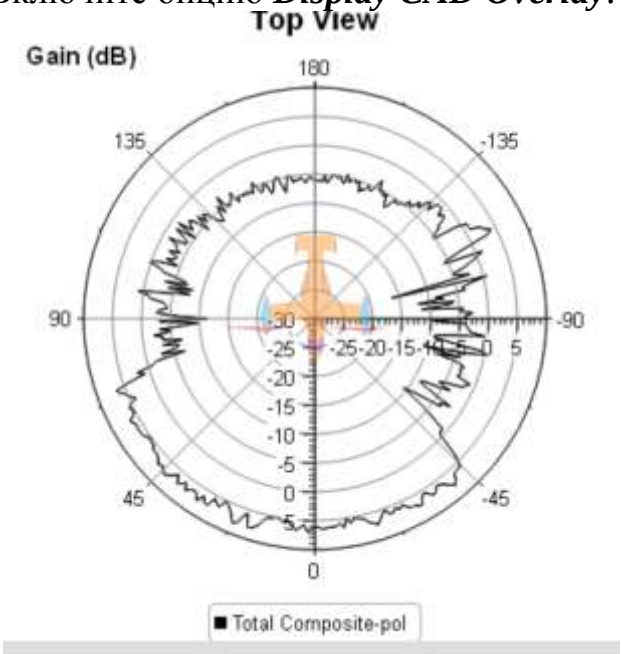


Рис. 13.12. ДН в полярной системе координат

Выполните какой-либо ввод из таблицы ***Multi-Run Sequence Steps***.

Наблюдайте, как график в полярной системе координат изменяется с каждым поворотом винтов (рис. 13.13). Также обновляется и рисунок **CAD**, внесенный на график. Это полезно для быстрого отражения результатов без необходимости создания нового графика.

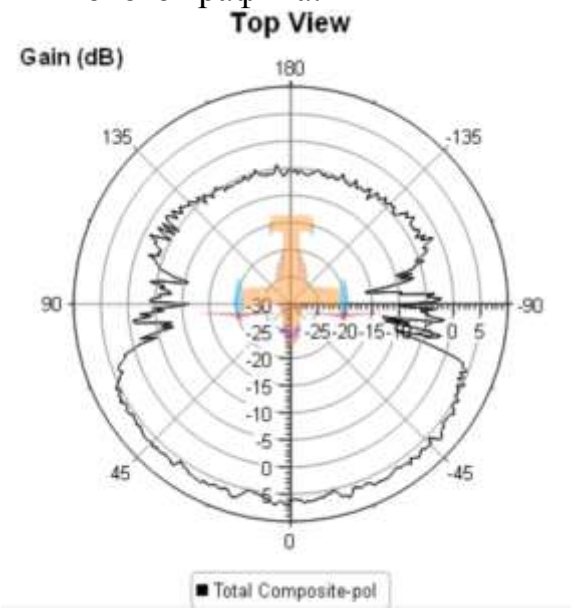


Рис. 13.13. ДН в полярной системе координат при повороте винта

Нажмите и протащите узел ***Results:Sequence 1:Step_1*** внутрь окна ***Polar Plot***. Измените вновь добавленную надпись ***Custom Legend*** к виду ***Initial State***.

Это добавляет фиксированную линию на график для построения результатов из конкретной записи. Как показывает источник данных в панели свойств, результаты приходят исключительно из **Step_1**. (рис. 13.14 справа). Глядя на ***Data Source*** из ранее созданной строки, видно, что ***Data Source*** является ***Sequence 1*** (рис. 13.14 слева).

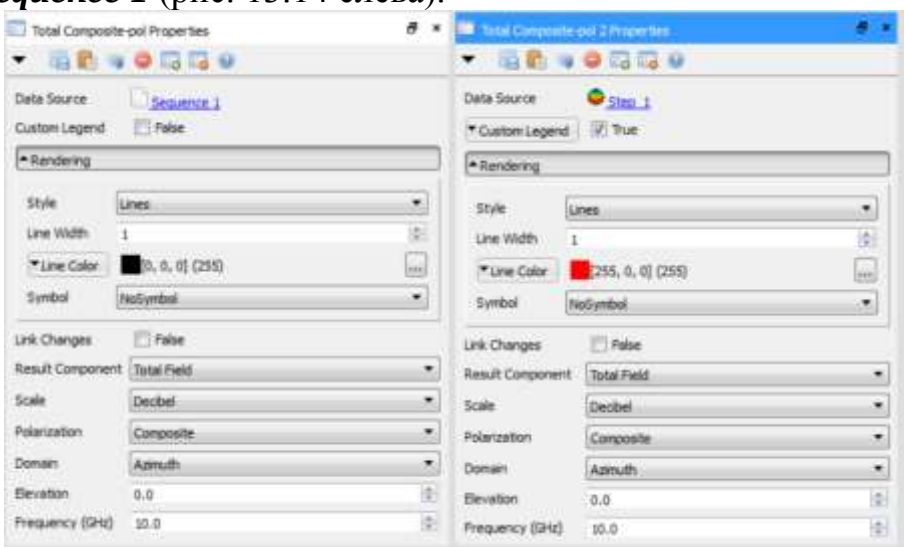


Рис. 13.14. Диалоги вывода характеристик на график в последовательности и на шаге

Выполнив итерацию записи из таблицы ***Multi-Run Sequence Steps***, можно видеть, как общее поле зависит от ориентации винтов (рис. 13.15-13.17). Для данного случая, можно видеть, как переменная влияет на диаграмму направленности при установке положения винтов на 30, 210 и 330º.

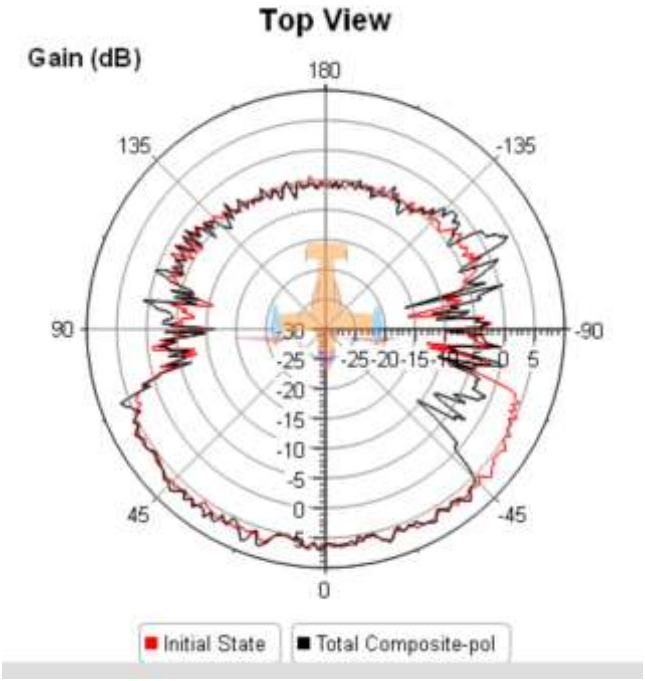


Рис. 13.15. Сечение ДН антенны на самолете при повороте винтов на 30º

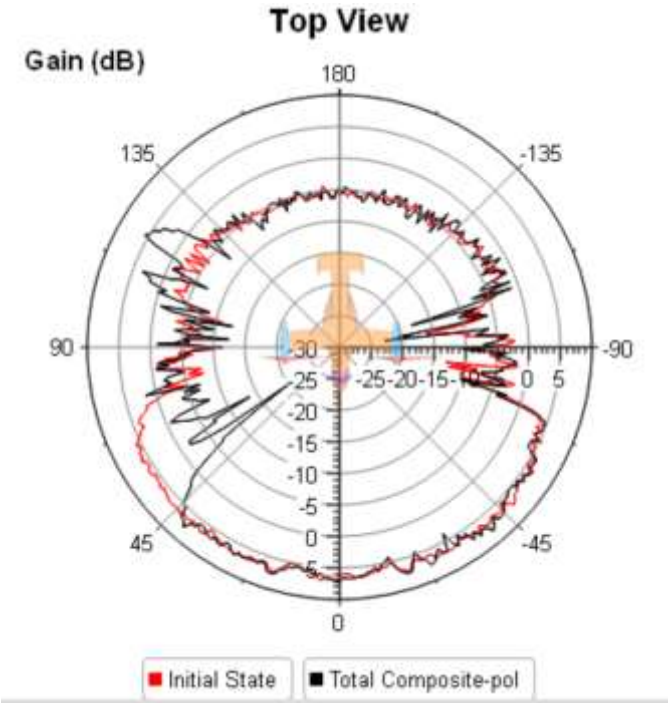


Рис. 13.16. Сечение ДН антенны на самолете при повороте винтов на 210º

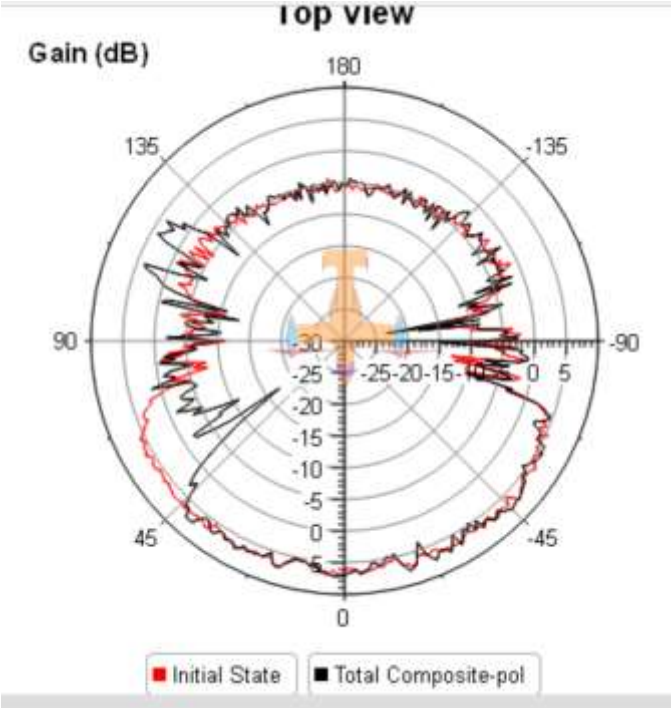


Рис. 13.17. Сечение ДН антенны на самолете при повороте винтов на 330º

Заключение

Асимптотические методы геометрической оптики, физической оптики и теории дифракции, реализованы в программах FEKO, CST и предназначены для решения большого круга задач. Реализация их в последних версиях HFSS ANSYS открывает новые возможности, благодаря большой скорости расчета. Это дает возможность моделировать радиосистемы на платформах большого размера, решать задачи электромагнитной совместимости с учетом сложной электродинамической структуры, покрытий, материалов и внешних облучений.

Численное моделирование заняло сейчас существенное место в процессе разработки радиоаппаратуры. Темп разработки существенно возрастает. Освоение космоса, космические исследования относятся к одному из основных направлений научно-технической революции. Рассмотрение этого направления в технико-экономическом аспекте представит определенный интерес для специалистов, разрабатывающих международные программы сотрудничества в области экономики, науки и техники.

Программа Savant значительно расширяет возможности HFSS ANSYS, Savant 18.0 включает несколько значительных улучшений по сравнению с предыдущими версиями. Темп обновления и создания новых программ ускорился и составляет сейчас до полугода, что дает возможность научным коллективам решать современные, актуальные задачи синхронно с требованием времени.

Литература

1. ansys.com - сайт производителя системы ANSYS HFSS
2. Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн. Москва. «Связь», 1980, 360 стр.
3. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ (Радиотехнический расчет и проектирование). М., «Сов. Радио», 1974, 240 стр.
4. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М., Наука. 1980,
5. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. С. Связь, 1978, 247 с.
6. James G.L. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves.- England: Peter Peregriims,1976.- 254 p
7. Бодров В.В., Исаков М.В., Пермяков В.А. Внешняя электромагнитная совместимость и антенны. 2005, М., МЭИ, 80 стр.
8. Коган Б.Л. Поляризационные характеристики антенн /под ред. В. В. Бодрова./ - Москва : Издательство МЭИ, 2013. - 47 с.
9. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью FEKO. М., СОЛОН-Пресс, 2018, 340с.
10. Кузнецов И.А., Грибанов А.Н., Курушин А.А., Мосейчук Г.Ф., Синани А.И. Организация расчетов в ANSYS HFSS под управлением программы, разработанной в MATLAB. Тезисы XXIII Научно-технической конференции АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», г. Жуковский 27-28 марта 2018 г.
11. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Многолучевые зеркальные антенны: Геометрия и методы анализа. М., «Горячая линия – ТЕЛЕКОМ» 2019,- 256 стр.

Об авторах:

Грибанов Александр Николаевич – к.т.н., начальник сектора АО «НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова», Окончил РТФ МЭИ в 1978 г. Разработчик программ математического моделирования характеристик излучения ФАР и АФАР, автор более 100 докладов, научных статей, патентов и зарегистрированных программ в области проектирования и эксплуатации антенных систем.

Кузнецов Иван Алексеевич – окончил РТФ МЭИ в 2017 г. Тема дипломной работы «Расчет пространственных характеристик антенной системы с электронным управлением луча». Решил ряд научных задач, работая в АО «НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова».

Курушин Александр Александрович – к.т.н., доцент каф. РТПиАС 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 20 учебных пособий и 100 научных статей.