



Ansoft 协同设计方法
—复杂波导系统设计

2008-06-12



目录

前言	2
一、 Ansoft 复杂无源器件仿真解决方案	2
二、 波导滤波器的设计	4
(一) Iris 波导滤波器设计	4
1) 在 HFSS 中进行的基本单元建模和仿真	4
2) 建立 HFSS 与 Ansoft Designer 间的动态链接	10
3) 在 Ansoft Designer 中求解	14
4) 在 Ansoft Designer 中完成滤波器的优化设计	15
5) 将 Ansoft Designer 中优化后的 IRIS 滤波器 export 到 HFSS 进行验证	17
(二) Comblin 滤波器设计	19
1) 在 HFSS 中进行基本单元的建模仿真	19
在求解设置部分可参考前述 IRIS 波导滤波器的设置，所不同的是求解频率为 0.4GHz	34
2) 在 HFSS 中进行基本单元的参数化扫描	41
3) 建立 HFSS 与 Ansoft Designer 间的动态链接	42
4) 在 Ansoft Designer 中完成滤波器的优化设计	46
5) Ansoft Designer 与 HFSS 的仿真结果对比与讨论	48

前言

HFSS 精确可靠的三维电磁场仿真彻底改变了传统设计流程，调试硬件原型的传统设计手段被对三维电磁场仿真模型的设计和优化所取代，大大地缩短了设计周期。尽管如此，Ansoft 仍不懈地致力于优化使用者的仿真设计流程，提高优化效率，从而进一步缩短设计周期。

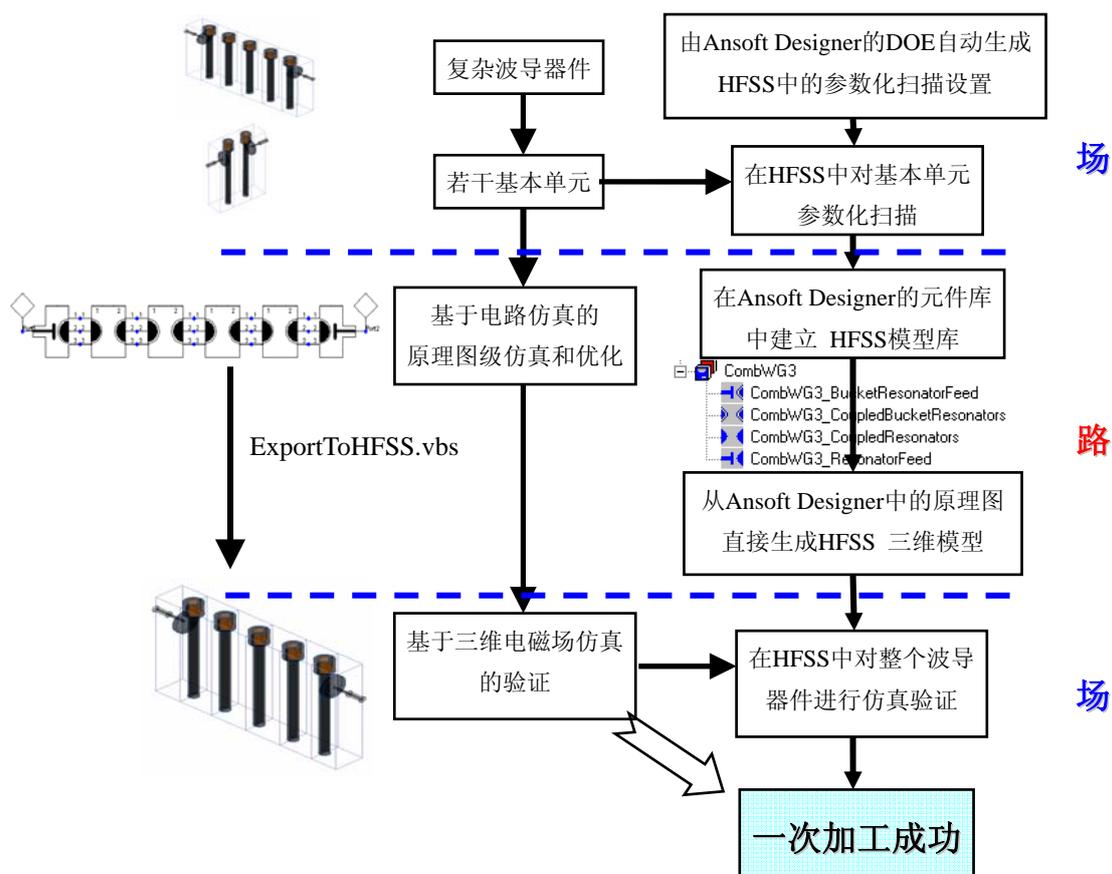
现今对于滤波器或其他复杂波导器件的理论研究和设计技术已经非常成熟，但设计工作依旧面临很多问题。电路仿真具有很高的速度，可快速的仿真出滤波器各个部件的集总电参数，但是在电磁场求解工具中设计真实的 3D 微波元件却需要花费数周的时间。本文主要阐述了电路仿真器如何与 3D 场仿真器协同完成设计工作，从而使设计周期从原先的数周缩短为数日。这种解决方案的核心是“场路结合、协同仿真”，优点是有效的结合了三维电磁场仿真的精度和电路仿真的速度，使微波无源器件的设计流程进入了新的时代。

下面我们将以几个具体的例子来说明这套通过“场路结合、协同仿真”来设计复杂无源器件的解决方案。

一、 Ansoft 复杂无源器件仿真解决方案

当电磁场仿真被设计者广泛接受后，我们进一步需要把这种技术应用到各种需要精确仿真求解的更大规模的设计问题中。这里就产生了一对速度与精度之间的矛盾，因为我们知道电路仿真速度是很快的，传统的仿真方法一般都是基于等效电路的。我们希望有一种切实可行的解决方案：能提供快速、具有电磁精度、且求解问题的规模不受限制。因为作为工程设计软件，仅仅解决求解精度问题是不够的，更重要的是能够提供一种高效率的、可操作性强的设计流程。“场路结合、协同仿真”的思路就是基于这种实际工程中的需求而产生的。

Ansoft 提供的这套复杂无源器件仿真的解决方案如下图所示：



首先，一个复杂的无源器件被拆分成若干基本单元，对于每个基本单元在 HFSS 中建立三维模型进行电磁场仿真和参数化扫描。参数化扫描的目的是为了后面将要进行的自动优化设计提供基本数据。在经过合理的划分基本单元之后，每个单元通常都是结构简单且电尺寸小。对于这样的结构，在 HFSS 中很容易就能得到收敛的仿真结果。在这一步，我们充分利用了场仿真的精度为后面提供了精确的基础数据源。

接着，HFSS 中的基本单元通过场到路的“协同仿真”链接到 Ansoft Designer 的电路设计原理图中。这样以来，整个复杂器件的导波特性和由电路仿真完成，电路原理图中的元件即为 HFSS 中的基本单元。

然而，如果“协同设计”仅仅停留在拟合 S 参数文件进行电路仿真的层面上，就只能用于设计验证，而不能用作设计。因为当仿真结果达不到设计指标时，我们无法对模型进行优化——显然在电路仿真层面上，只剩下基本元件的 S 参数，所有三维结构信息全部都丢失了，因而想要无法实现了对整个结构进行电路级的优化——如果应用不同厂家的电磁场仿真器和电路仿真器就必然面临这种情况。

Ansoft“协同设计软件包”的最大优势在于它同时包含强大的三维电磁场仿真工具 HFSS 和电路仿真工具 Ansoft Designer，当 HFSS 中的基本单元以元件的形式插入 Ansoft Designer 的电路设计原理图时，除了 S 参数之外，所有的变量（如尺寸、材料特性）和参数化扫描结果都可被动态链接进来，从而为基于电路仿真的优化设计提供基础数据。在 Ansoft Designer

中进行优化时，即使是 HFSS 中参数化扫描没有的点，也可以由插值算法得到，整个器件的优化过程可以直接在电路级进行。

在电路级完成整个器件的优化后，原理图还可以通过脚本直接输出到 HFSS 进行验证，从 HFSS 中输出三维模型到机械 CAD 软件。

并且，针对几种波导器件类型，如 Iris 波导滤波器、腔体滤波器和分支线耦合器，Ansoft 还可提供给 Ansoft Designer 用户波导器件库。器件库不仅包含所有元件的 HFSS 模型，还有帮助实现设计自动化的脚本文件，并且支持 DOE【1】的设计方法。

接下来我们看几个应用这种解决方案设计复杂无源器件的实例。

二、波导滤波器的设计

(一) Iris 波导滤波器设计

Iris 滤波器经常被用作窄带滤波器的设计。一个带宽很窄的滤波器要求的求解精度是很高的，因为每次自适应求解后滤波器的工作频带都会微微地向高频处漂移，加之 S12 曲线的斜率十分陡峭，因此通常需要较多的求解次数才能收敛。然而，当将 Iris 波导滤波器拆分成单元后，每个单元的频响都不会呈现出带通的特性，就不存在收敛难的问题了。在这种设计上应用场路结合的解决方案十分划算。详细的设计步骤可总结如下：

1) 在 HFSS 中进行的基本单元建模和仿真

如下图 2 (a)所示为一个典型的 Iris 波导滤波器。根据这样的外形，我们可以轻易地将它分解为图 2 (b) 和 (c) 两种基本单元。基本单元(b)表示的是滤波器的 IRIS 部件；对于电特性来说，(b) 应该只包含 IRIS 隔膜部分，但是由于高次模的问题在建模的时候不能这样处理，我们必须包含两段连续的波导。通过 HFSS 中 waveport 的 deembed 功能可将 S 参数的参考平面推到 IRIS 隔膜的根部。

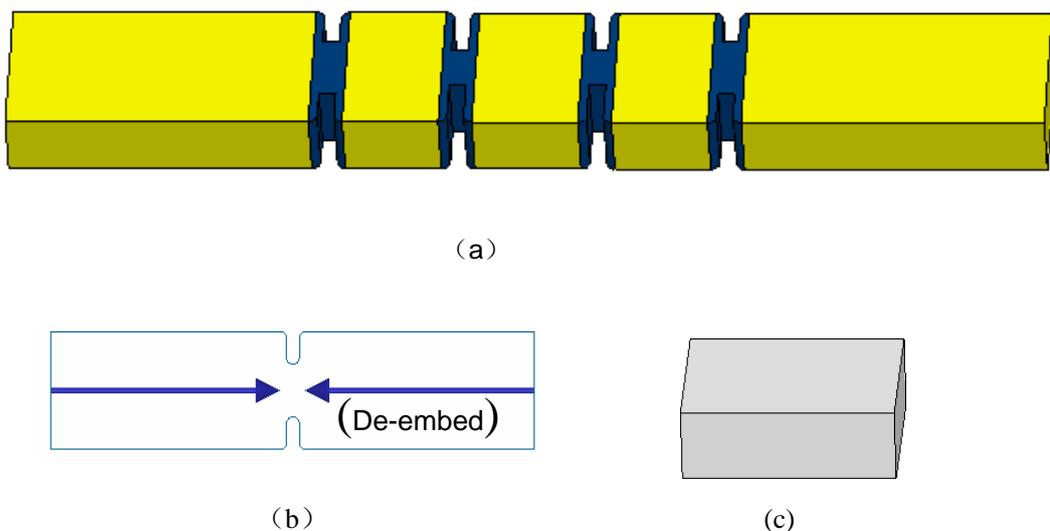
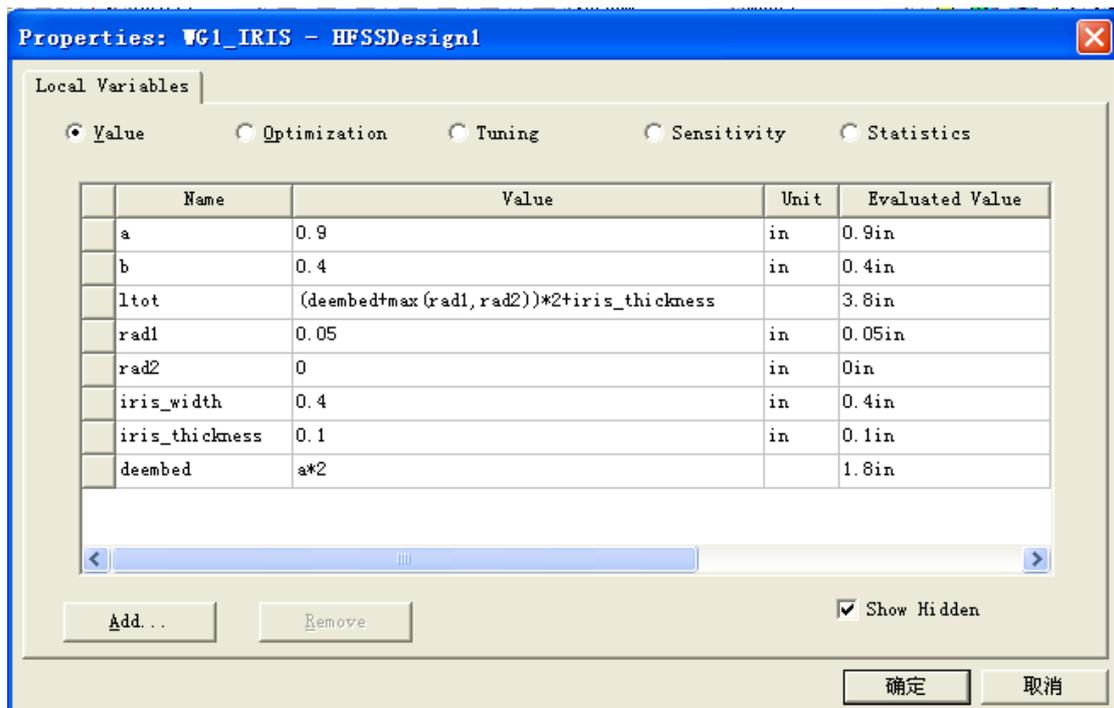
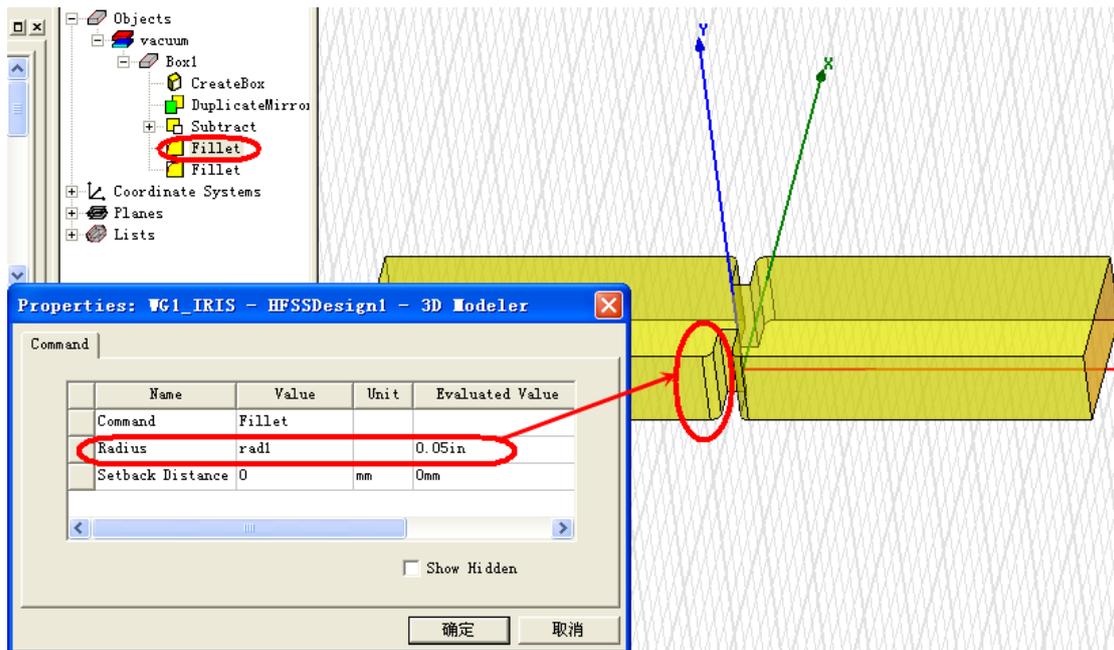
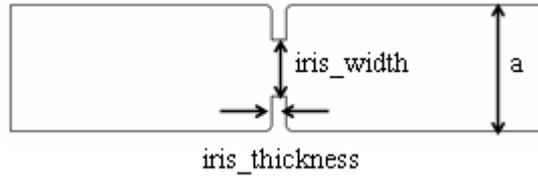
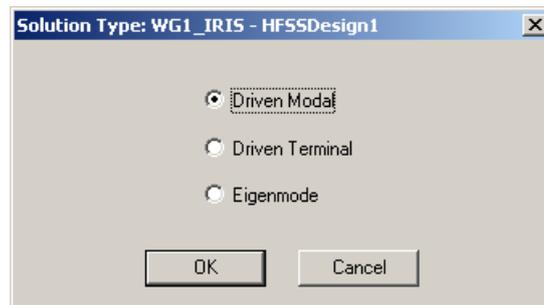


图 2

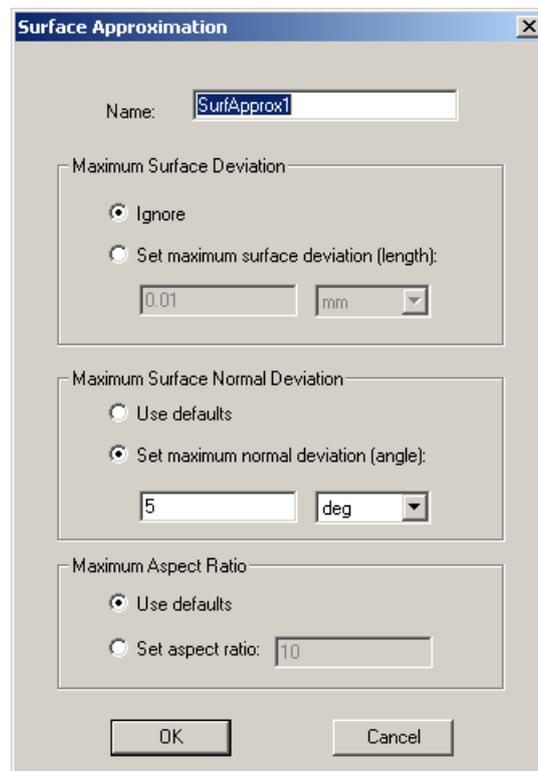
波导采用 WR-90 标准波导，波导截面的长和宽分别为 a 和 b，侧边的倒角采用 HFSS 中的 Fillet 功能：选中需要倒角的边（一次可同时选中多条边），3D Modeler-> Fillet。IRIS 具体尺寸如下：



接下来，我们将对这两种基本单元建模并求解。首先，波导结构的求解可使用“Driven Model”求解类型；



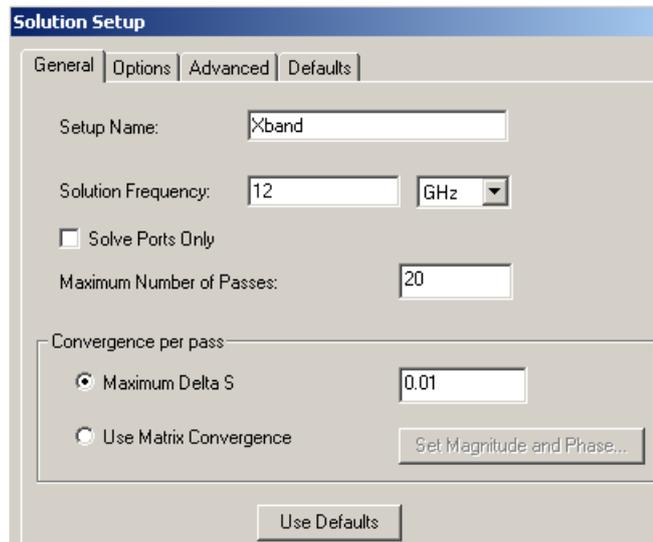
如图 2 (b) 所示，波导插入膜片处采用的倒园角的工艺。在这些倒角处可配合相应的手动网格剖分。选定波导结构，右键选择“Assign Mesh Operation”中的“Surface Approximation”，指定“Normal deviation”为 5 度（90 度的角共切 18 个面）。



波导器件的求解设置可参照以下步骤：

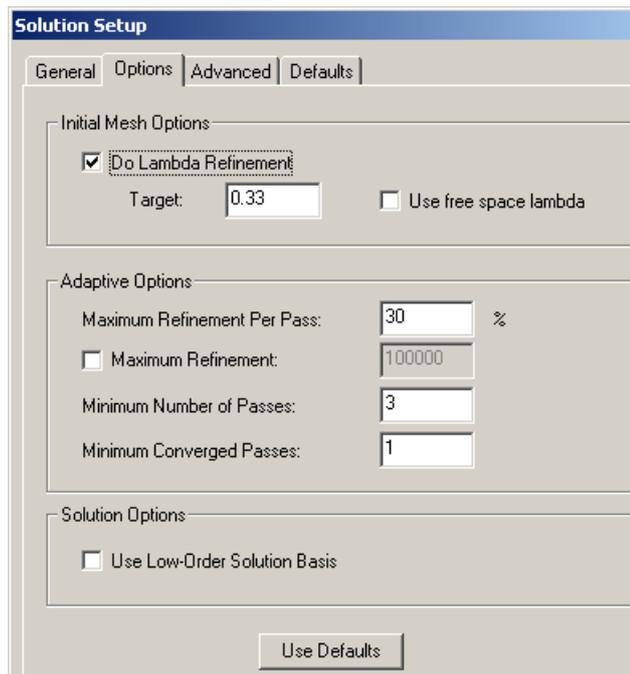
- i. 插入一个新的求解设置，以这个波导滤波器为例，如果需扫频频带为 8~12GHz 的话，选择 12GHz 为求解频率；
- ii. 为了避免与后面在 Ansoft Designer 中的仿真产生累积误差，在 HFSS 中需设置较高的求解精度：
 - i. Maximum Number Of Passes（最大迭代次数） = 20

- ii. Maximum Delta S (S 参数矢量差的最坏值) = 0.01



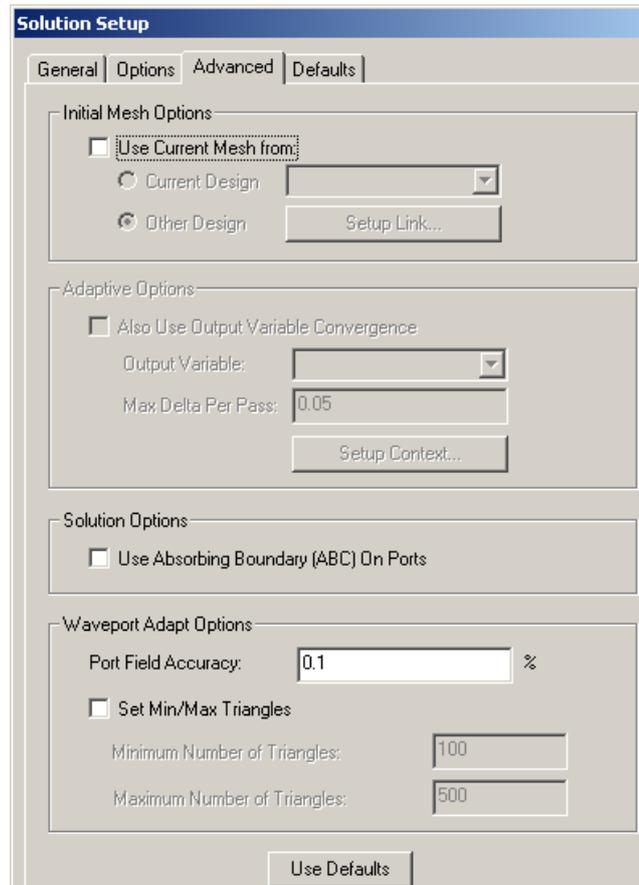
The image shows the 'Solution Setup' dialog box with the 'General' tab selected. The 'Setup Name' is 'Xband', 'Solution Frequency' is '12 GHz', and 'Maximum Number of Passes' is '20'. Under 'Convergence per pass', 'Maximum Delta S' is selected with a value of '0.01'. There is a 'Use Defaults' button at the bottom.

- iii. Maximum Refinement Per Pass (每次迭代最多增加的网格量占上一次网格量的百分数) = 30
- iv. Minimum Number Of Passes (最小迭代次数) = 3



The image shows the 'Solution Setup' dialog box with the 'Advanced' tab selected. Under 'Initial Mesh Options', 'Do Lambda Refinement' is checked with a 'Target' of '0.33'. Under 'Adaptive Options', 'Maximum Refinement Per Pass' is '30 %', 'Minimum Number of Passes' is '3', and 'Minimum Converged Passes' is '1'. There is a 'Use Defaults' button at the bottom.

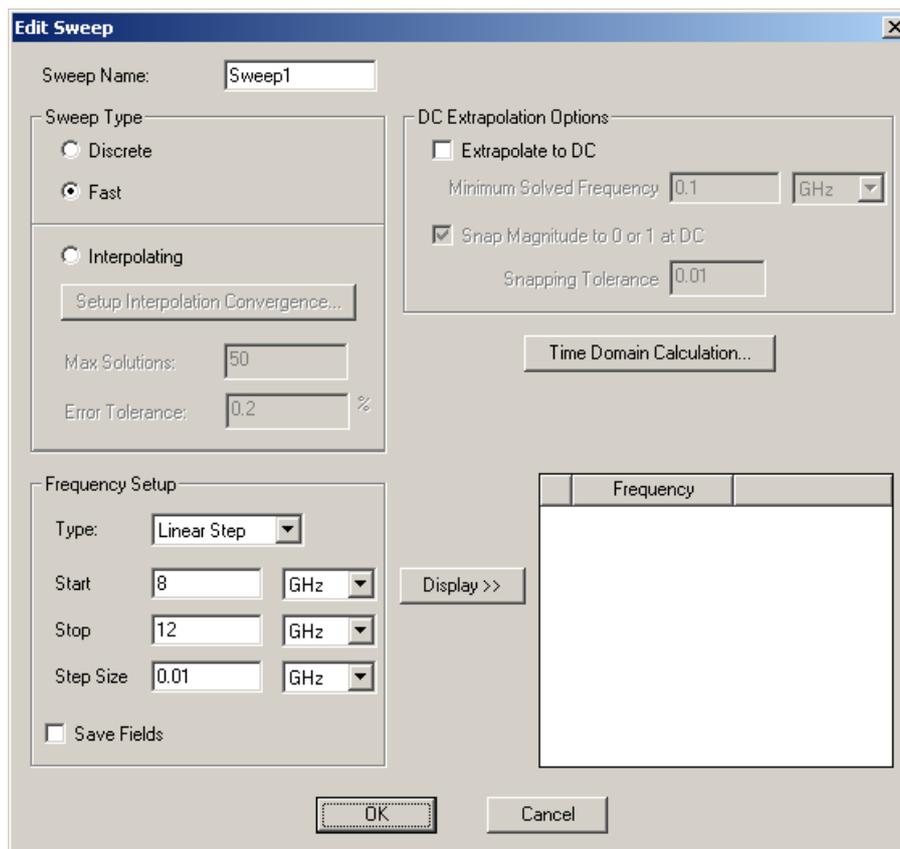
- v. Port Field Accuracy (端口求解精度) = 0.1%



扫频设置:

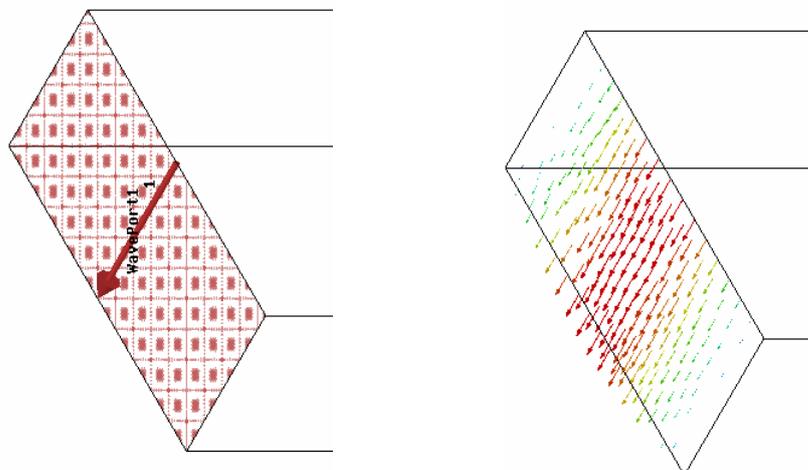
- i. 考虑到后面要使用与 Ansoft Designer 的协同仿真，每个求解设置下必须只包含一个扫频设置（在 HFSS 单独使用时，扫频设置的数目不受限制），并且扫频设置使用默认名称“Sweep1”
- ii. 对于波导结构来说推荐使用快速扫频；只有当仿真的频段达到波导的截至频率时，才推荐使用插值扫频；

取消“Save Fields”前面的勾选可减少硬盘空间的需求；



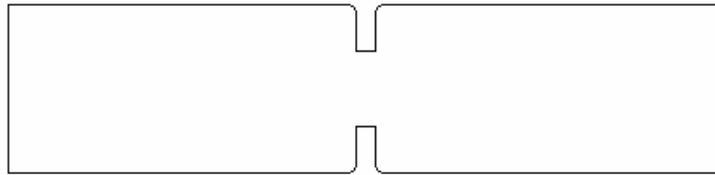
端口设置:

- i. 使用波端口 (waveports)
- ii. 仅求解一个模式 (主模)
- iii. 在每个基本单元的两个端口上都定义积分线, 这样可以避免求解出的电场相位有 180 度的相差;



- iv. 这样以来，在每个端口处都只求解主模；我们知道在波导内部，IRIS 的存在会产生高次模（消逝模式）；然而，这些模式会迅速呈指数衰减，当波端口距离 iris 足够远时，这些高次模还没反射到端口处就已经衰耗到很小的数量级（通常小于-20dB 时，高次模可被忽略不计），工程上可忽略不计；

在 IRIS 基本单元中，我们可以设置波导长为 $2*a$ ， a 为波导截面的宽；



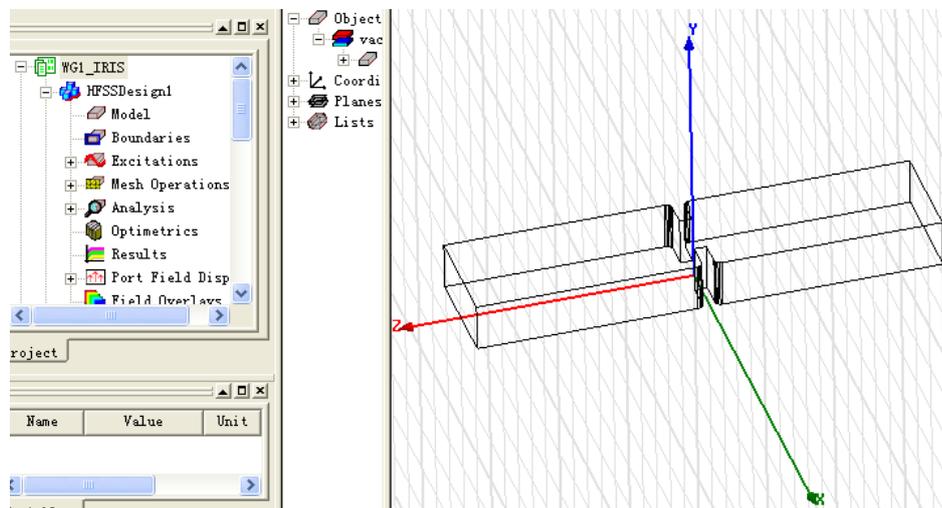
- v. 在这个例子中，我们把波导壁简化为理想导体，可无需画出波导壁，HFSS 会默认仿真物体与背景交界的面为 PEC，这将不考虑金属损耗；
- vi. 如果结构中存在两个放置很近的 IRIS，这种情况下可能除了主模以外的少数几个高次模在到达波端口之前还没有得到很好的衰减，那么你需要将两个 IRIS 一并当作一个基本单元在 HSS 中仿真；

2) 建立 HFSS 与 Ansoft Designer 间的动态链接

当对 HFSS 中的基本单元求解和参数化扫描完成后，就可以着手建立 HFSS 到 Ansoft Designer 的动态链接了。

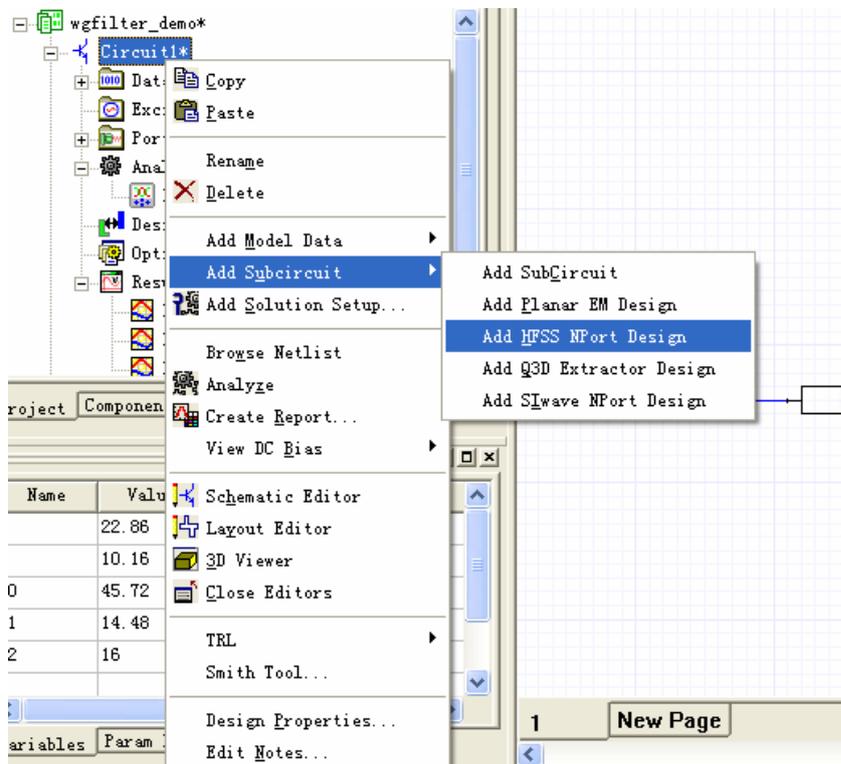
在 Ansoft Designer 中插入一个电路设计，Project → insert circuit design, Layout technology 选择 none。

我们现插入 IRIS 基本单元，下图为 IRIS 基本单元的 HFSS project。



如下图所示，在 project manager 中，右键 circuit，插入一个 HFSS 子电路。这样

HFSS 中的设计会以 N 端口元件的形式插入到 Ansoft Designer 的电路设计中来。



接着，你会看到一个动态连接设置的窗口 “Dynamic NPort import”。

“File” 栏，通过路径查找选中需要链接进来的 HFSS 基本单元 project;

“Design” 栏用来选择具体是哪个 design，因为一个 HFSS project 中可以同时管理多个 design, (Tips: 我们可以将所有 HFSS 基本单元的设计都存放在一个 HFSS project 下，然后给每个基本单元的设计做不同的命名，这样便于查找);

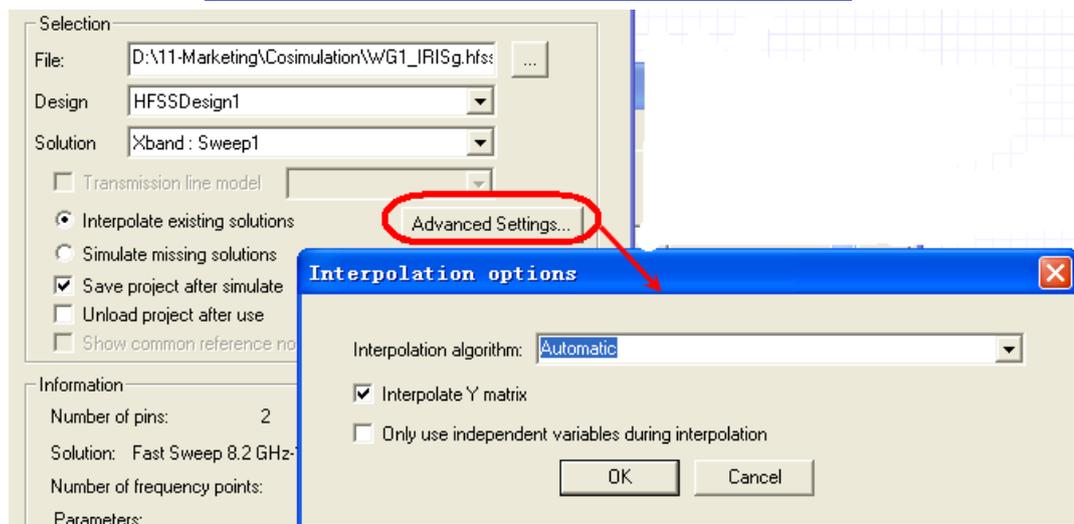
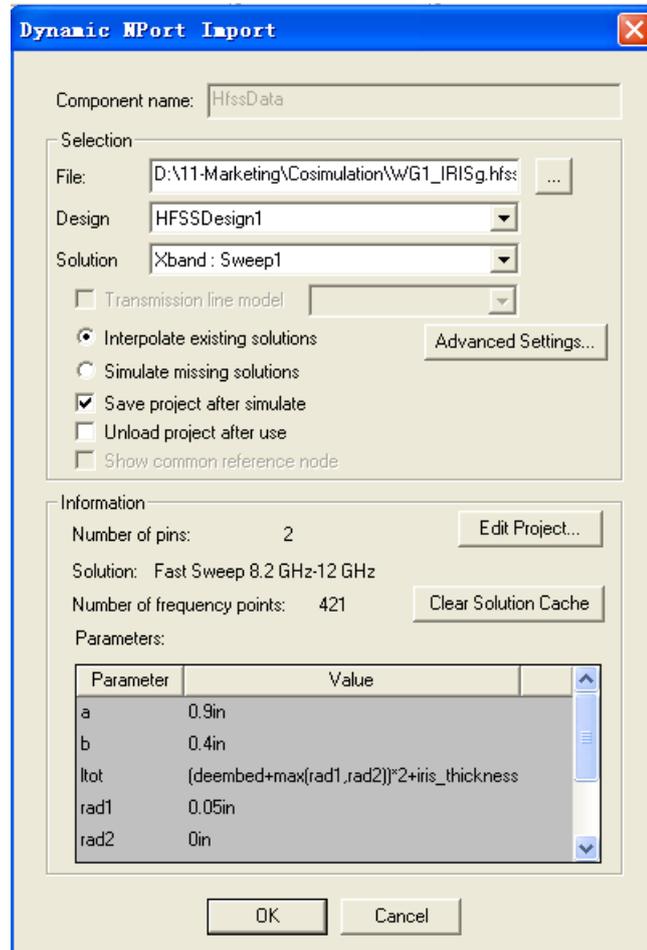
“Solution” 栏，当一个 design 中包含多个求解设置 (solution setup) 时 (比如分多个频段求解)，在这里可以选择某一个求解及扫频设置。具体选择哪一个要根据你在 Ansoft Designer 中需要做的频率扫描范围而定。

选择 “interpolate existing solutions”，当 Designer 的求解涉及到 HFSS 的仿真结果以外的值时，(如 linear network analysis 中的扫频点，或在 Designer 中进行优化时的优化变量值)，Designer 会根据插值算法计算出缺少的数据，这个功能在进行扫频和优化时极为有用。否则，也可以选择 “simulate missing solutions”，这样当遇到没有求解数据的电视，HFSS 的求解引擎会被自动的唤起进行求解。

插值算法还包含一些高级设置— “advanced setting”，提供根据不同的曲线特征选择相应插值算法的功能。关于这部分的细节就不在这里赘述了，感兴趣的设计者可参考 online help 中的相关内容；否则，按照默认设置即可。

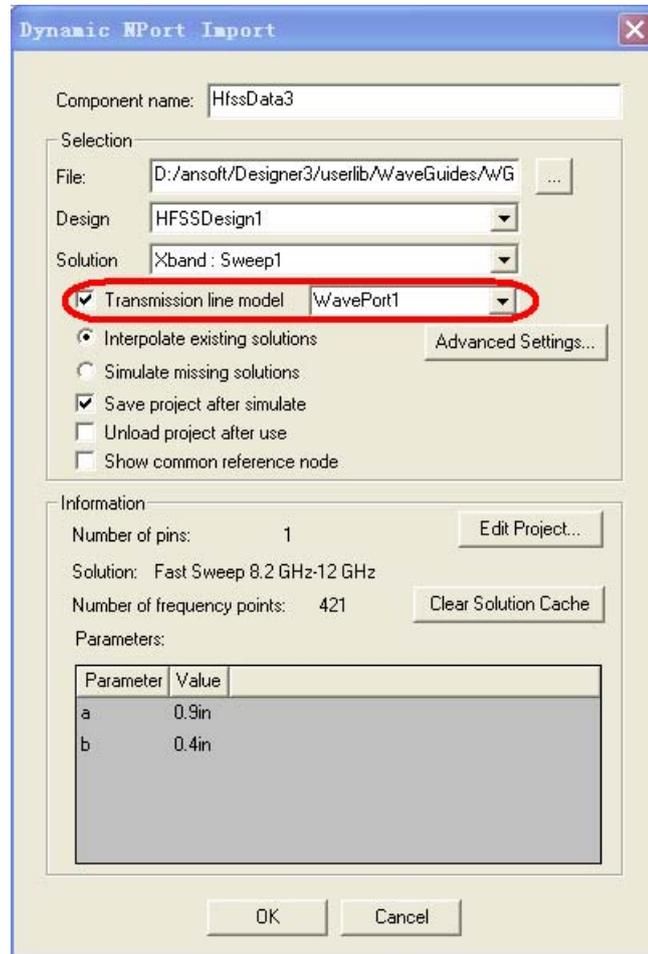
“Information” 中，给出了 pin 脚数目的信息等，一般与 HFSS 中的端口数目一致。

“Parameter” 中可以看到所有 HFSS 中定义的变量，它们能够被乖乖地传递到 Ansoft Designer 中，用做优化。

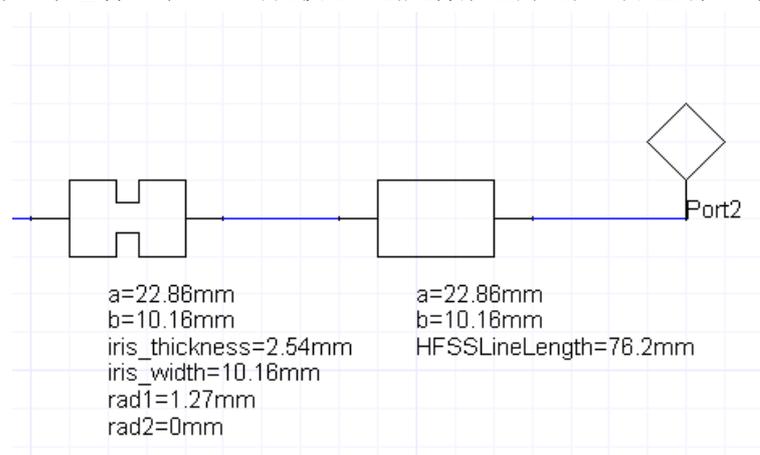


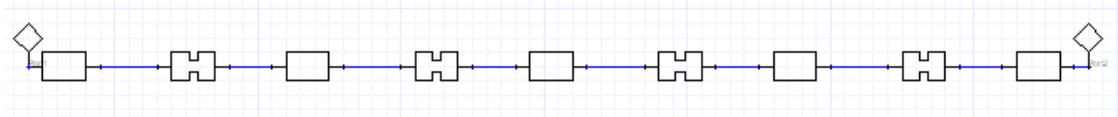
另一种基本单元如图 2 (c) 所示为一端空波导，它可用来调节相邻 IRIS 之间的间隔。我们可以利用两种方法来实现这段空波导。第一种方法大家都能想到，就是做一个两端口波导，然后将波导的长度进行参数化扫描，作为 Designer 中优化的基础数据，这里就不再赘述了。

我们这里重点介绍一种更方便快捷的方法：利用“transmission line model”来方便的链接进一端均匀传输线。当 HFSS 的设计被链接到 Ansoft Designer 时，除了端口的特性阻抗外，端口模式的传播系数（包含衰耗和相移因子）也都会被传递到 Designer。对于均匀传输线，在 HFSS 中只需设置一个端口，Designer 便会根据这个端口的特性阻抗和波传播系数计算出不同长度情况下的传输线 S 参数。在这个过程中，仅仅是不断的调用 HFSS 的后处理引擎，无需重新求解，因此速度非常快。



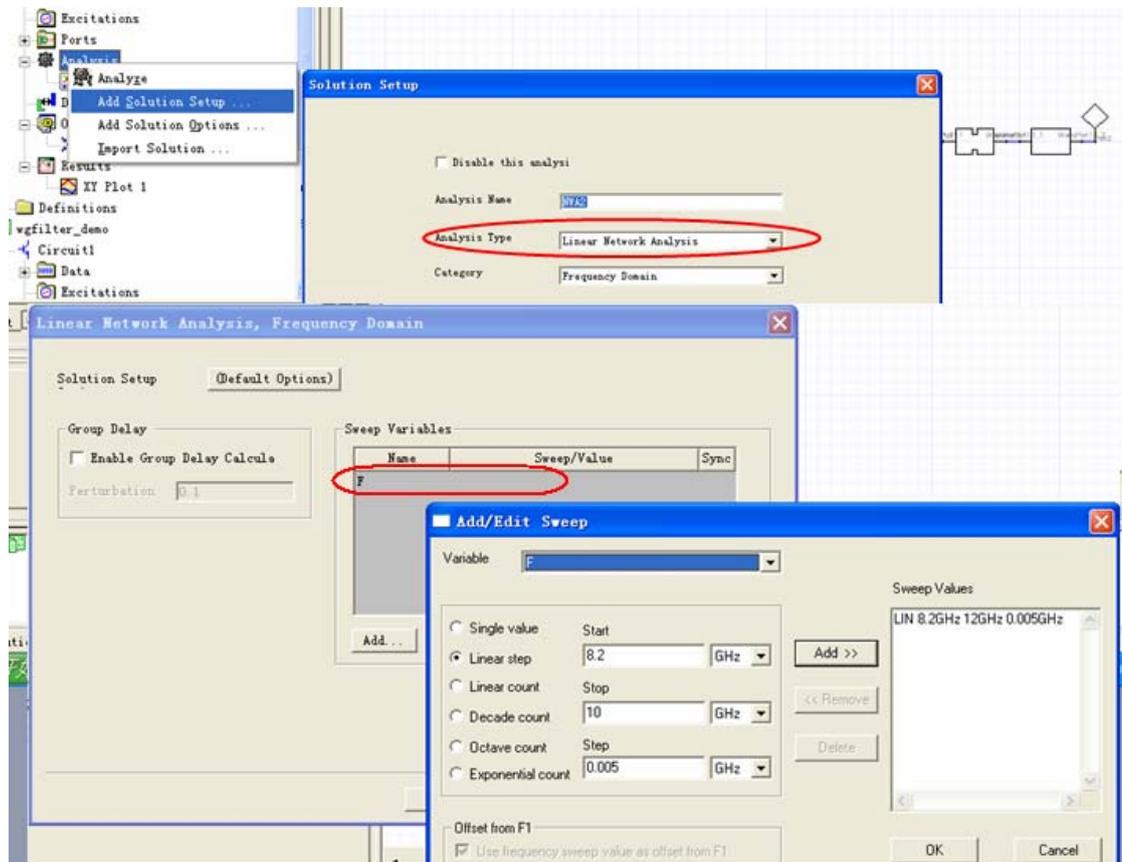
当动态链接设置好之后，基本单元可通过简单的 ctrl+c, ctrl+v 复制出多个来，比如我们要设计一个包含 4 个 IRS 的滤波器。当元件放置好之后，加上端口，如下图所示：



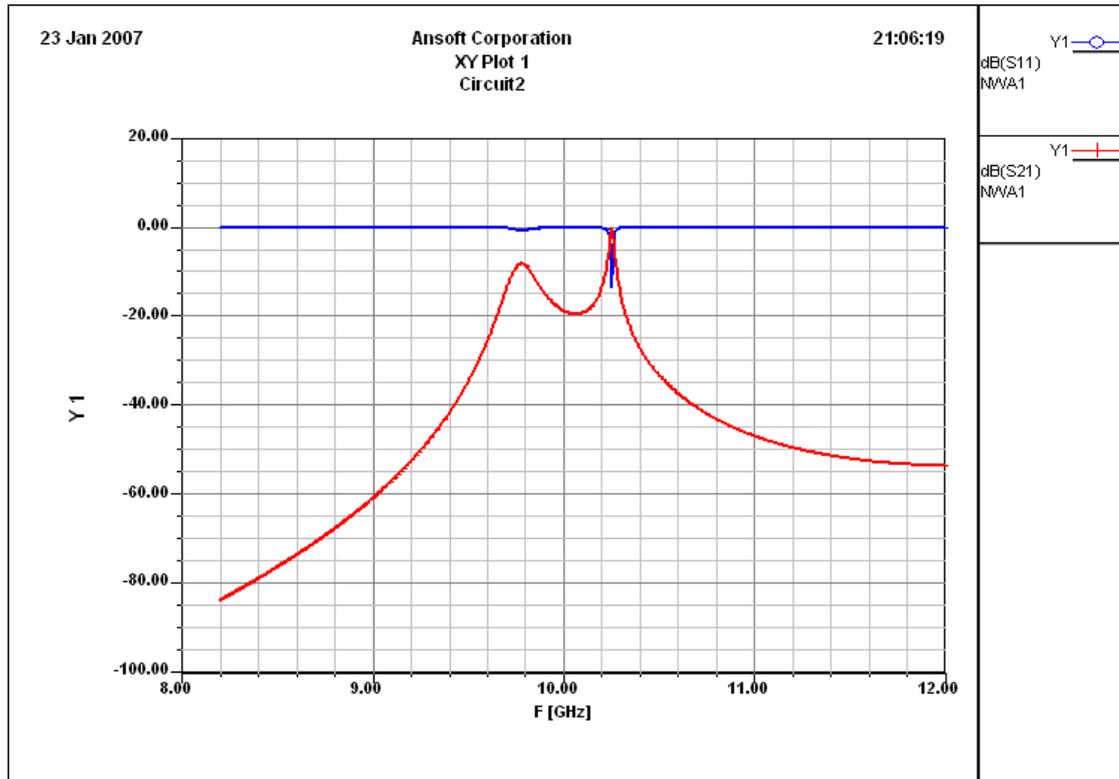


3) 在 Ansoft Designer 中求解

Ansoft Designer 中的求解设置相比 HFSS 要简单得多。如下图所示，添加一个“Linear Network Analysis”，然后设置扫描范围 8.2~12GHz 即可。



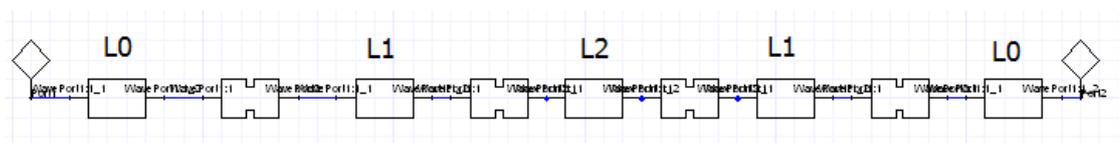
根据初始设计得到的 S11 和 S21 仿真结果如下所示。滤波器的带通特性还没有体现出来，显然需要做优化。

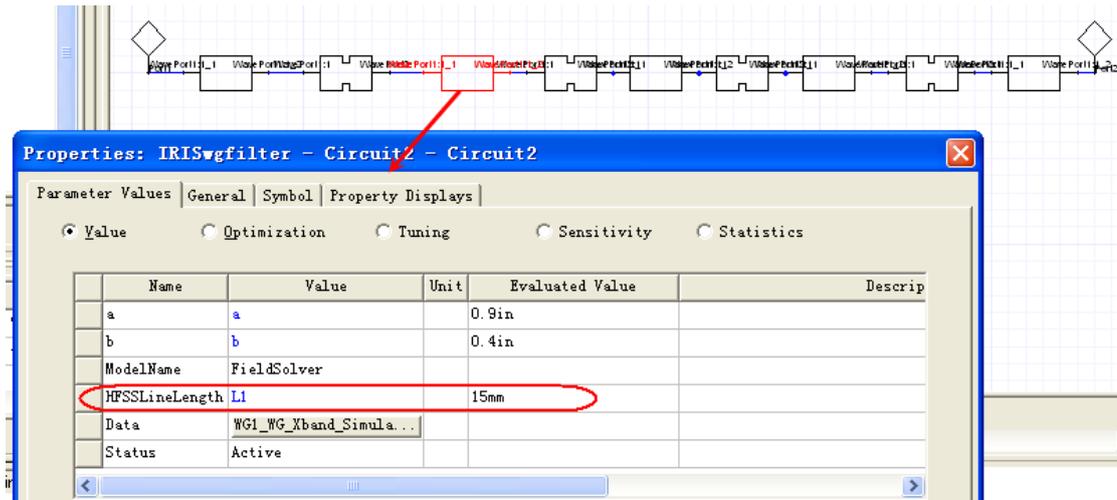


4) 在 Ansoft Designer 中完成滤波器的优化设计

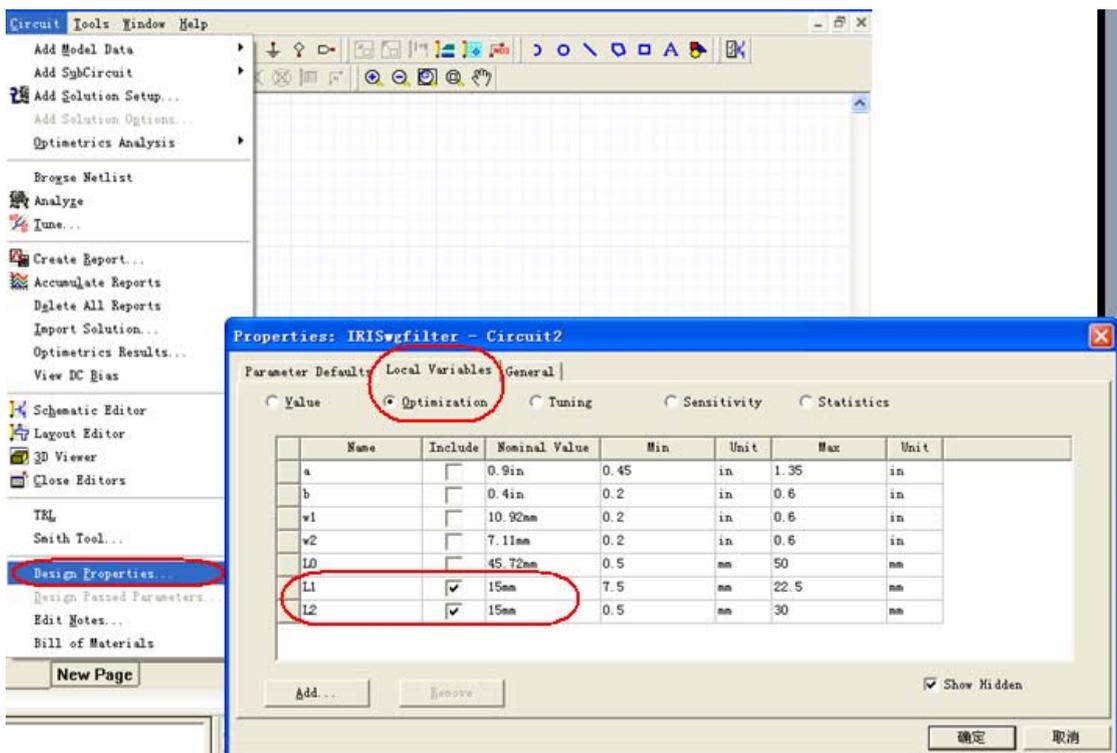
HFSS 中的变量被传递到 Ansoft Designer 中之后，都显示为基本单元的属性。进行优化之前，要重新设置变量。

下面我们以优化 IRIS 间的距离为例。根据 IRIS 带通滤波器结构对称的特性，5 段空波导的长度可以如下分别定义变量为 L_0, L_1, L_2 ；其中 L_0 的长度与带通特性无关，我们只需要优化 L_1 和 L_2 即可。

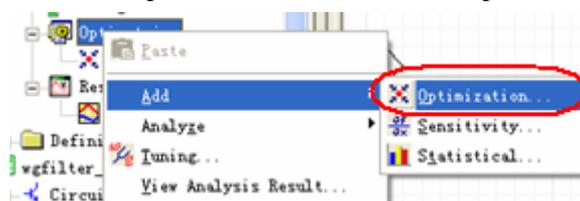




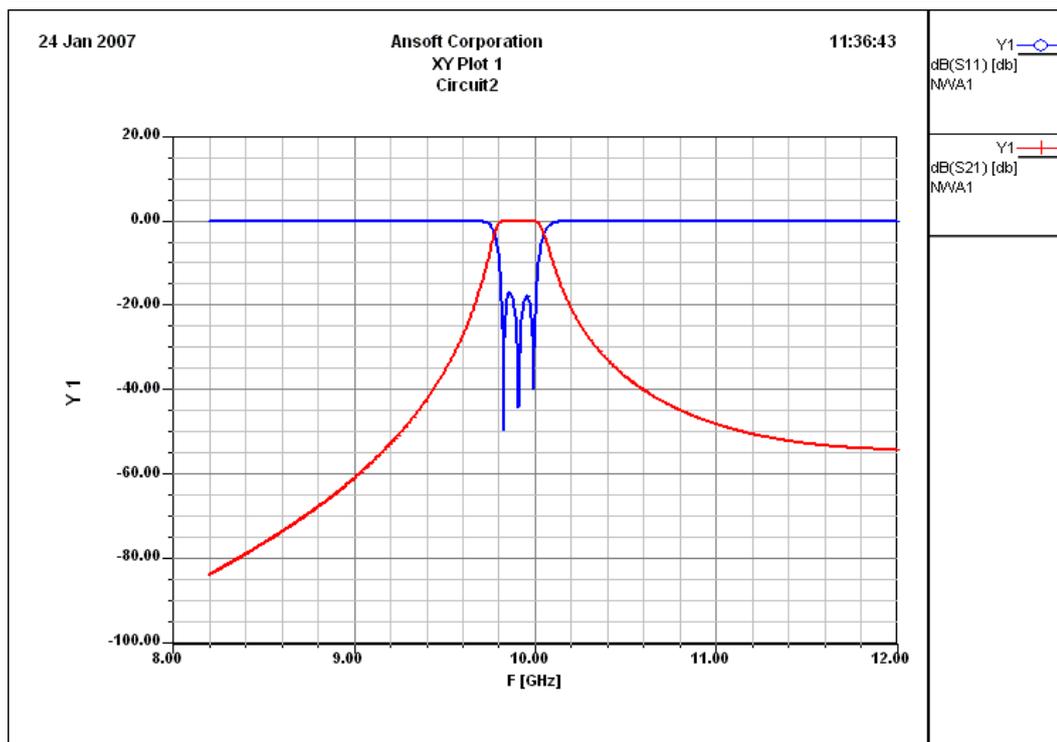
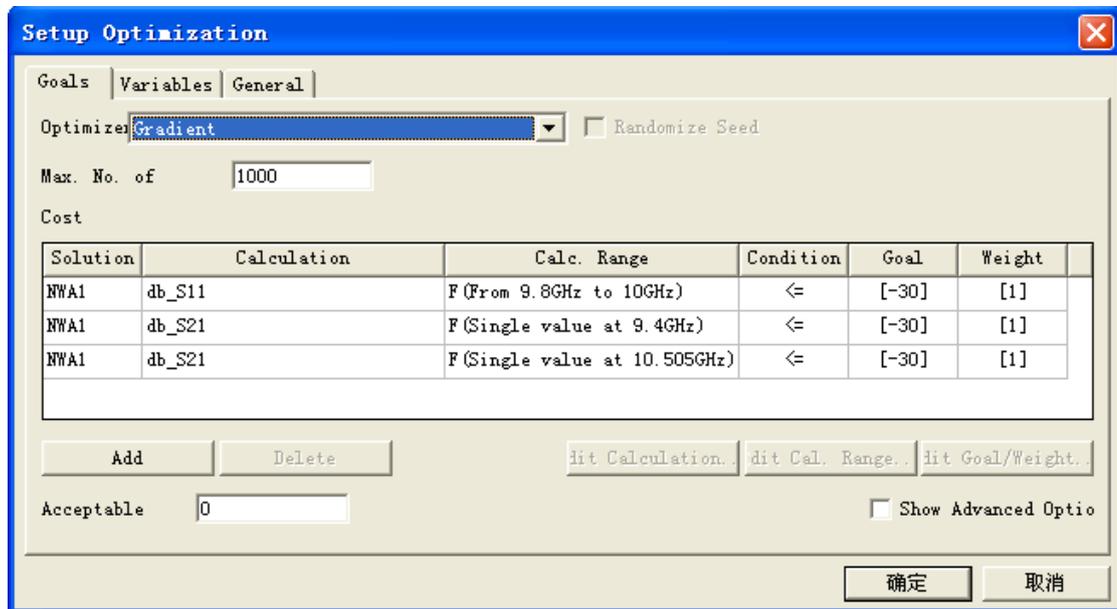
设置优化目标之前，要先选定参与优化的变量。如下图所示，“design properties”的“local variables”中将 L1 和 L2 勾选。另外，为 L1 和 L2 设置适当的初始值，以及取值区间也会提高优化效率和效果。



接着定义优化设置。在“Optimetrics”中 add 一个“Optimization”。



如下图所示，一个优化设置中可同时包含多个优化目标，并且可同时对多个变量进行优化。（优化设置中的更多细节功能这里就不再赘述了，请参考 online help）

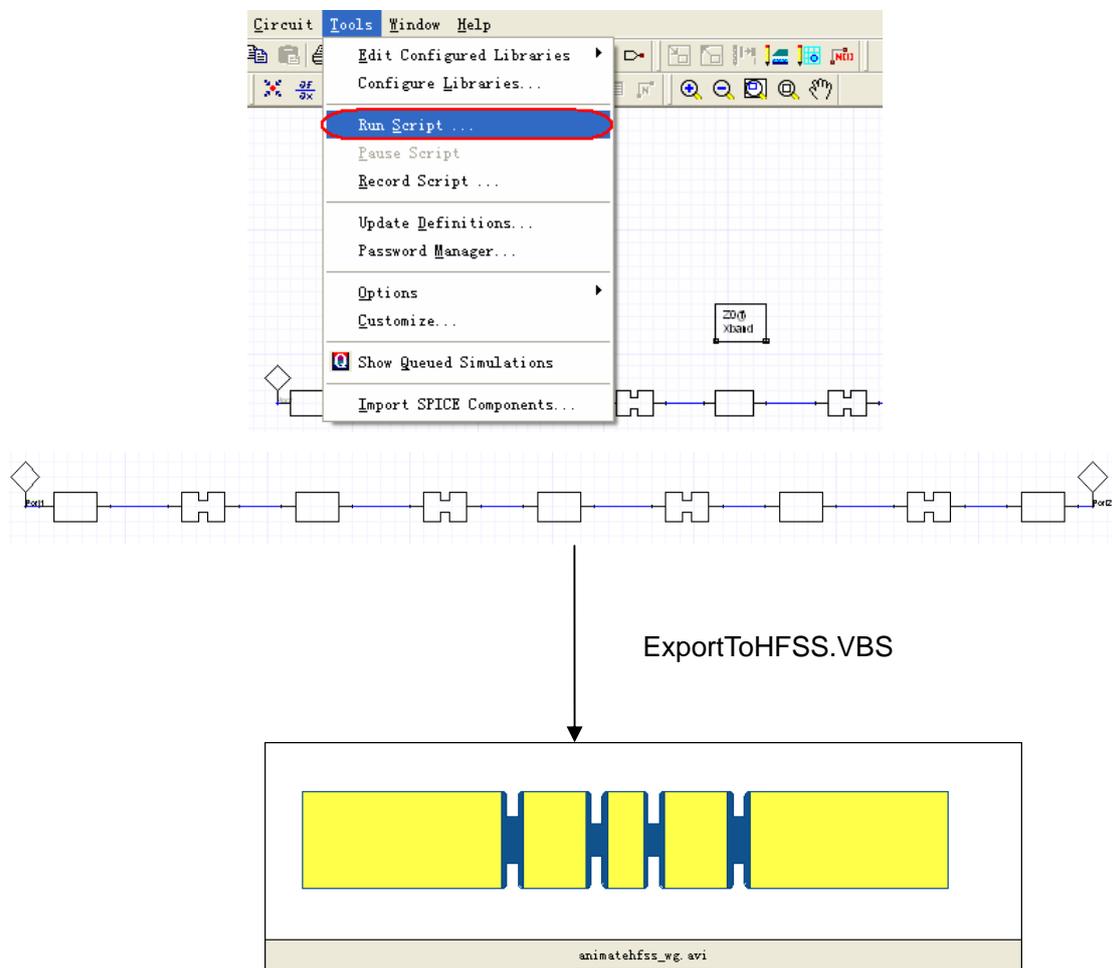


5) 将 Ansoft Designer 中优化后的 IRIS 滤波器 export 到 HFSS 进行验证

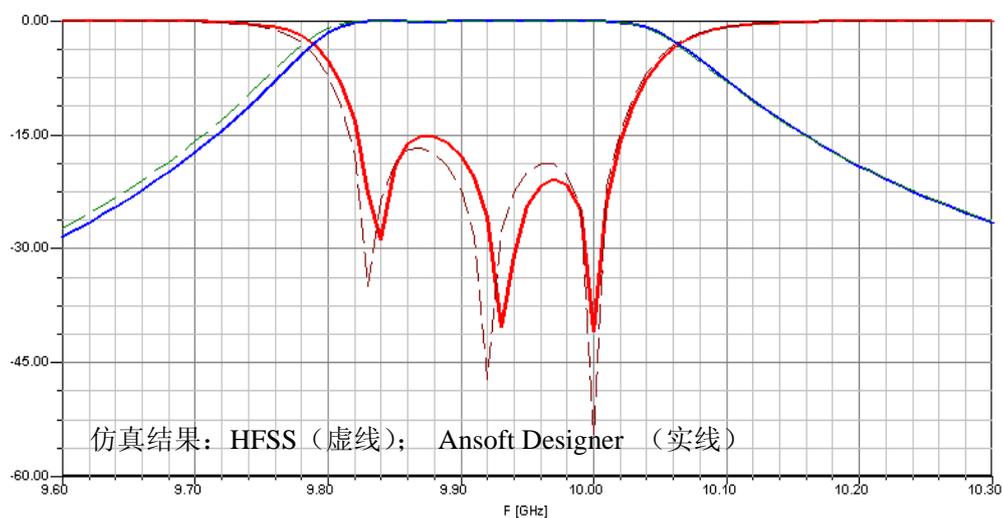
Ansoft Designer 中的通过 HFSS 动态链接的到的原理图可通过脚本程序直接输出到 HFSS 成为一个 ready to solve 的设计。在 Ansoft Designer 的波导库中包含这样的脚本程序。这样就形成了一个工程设计的完美闭环。

在 Ansoft **HFSS** 的菜单栏，Tools->Run Script，运行 ExportToHFSS.vbs 脚本（改脚本 layout->export to hfss生成 一个.vbs脚本文件,通过hfss打开脚本文件从而进行仿真验证.

需配合 Ansoft 波导库使用), Ansoft Designer 中的 Iris 滤波器原理图就直接 layout 到 HFSS 了。我们接下来可以对比一下 HFSS 和 Designer 中对整个滤波器的仿真结果。



如下图所示, 虚线部分为 HFSS 的仿真结果, 实线部分是 Designer 的仿真结果, 可以看出, 不论是在通带范围、带外抑制, 还是 ripple 的大小上, 两种仿真结果都十分吻合。



(二) Comblin 滤波器设计

接下来我们以一个的 comblin 同轴腔体滤波器为例进一步说明协同设计的用法。这种类型的滤波器经常用作大功率的无线通信以及广播中。Chebychev 带通滤波器在通带内有波纹，比起 Butterworth 型（通带内最平坦）滤波器具有更强的带外抑制比。通常，设计一个 Chebychev 型带通滤波器需要考虑以下指标：波纹水平（ripple）、中心频率、阶数、带宽。这些指标就能将整个滤波器的频响特性描述出来。以接下来要设计的滤波器为例，中心频率为 400MHz，带宽为 15MHz。

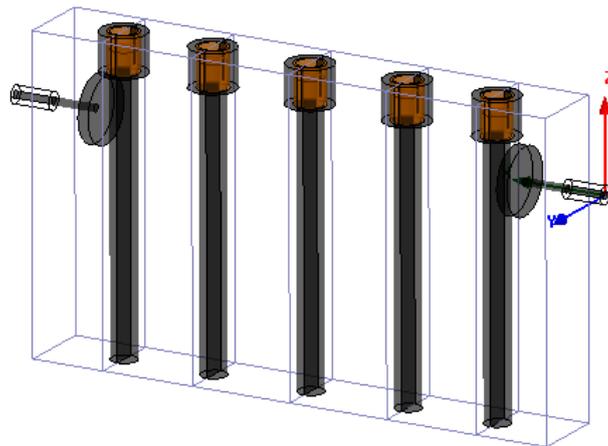
当然不止一种结构能够达到上述设计指标，前面介绍的 IRIS 波导滤波器就是一种，而在本节中介绍的滤波器是由多个金属棒和腔体构成的。由图 3 (a) 所示，金属棒在底部与腔体连接，在顶部伸进金属扣中，但并不接触。每个金属棒和金属扣都形成了一个谐振器。在输入和输出端，同轴线与能量辐射器（即与同轴相连的圆盘）能够提供必要的能量耦合。

对于结构的设计中包含许多尺寸变量，我们选择其中的某些尺寸赋予固定值，比如金属棒谐振器半径、金属扣尺寸（内外半径和高）、辐射器尺寸、腔体尺寸。然后我们通过对下列尺寸的调整来达到设计指标：中间 3 根金属棒的高度、外侧 2 根金属棒的高度、金属棒间的距离以及辐射器距离最外侧金属棒的距离。根据结构的对称性，也就是说我们只要通过调整 5 个变量的尺寸就可以完成对这个由 5 个金属棒谐振器构成的滤波器的设计了。

对于该类滤波器的设计原理，请参考 B.Mayer 博士和 Martin Vogel 在 2002 年发表的论文“Design Chebychev bandpass filters efficiently”。在这里，我们着重介绍的是协同仿真部分的操作方法。使用者掌握设计方法之后便可以自行增减腔体的数目以及调整结构尺寸来完成自己的设计任务了。

1) 在 HFSS 中进行基本单元的建模仿真

我们可将这个同轴腔体滤波器如下分割为由图 3(b), (c)的基本单元组成的结构。与前述的滤波器设计流程相似，我们也需要对每个基本单元在 HFSS 中进行建模和仿真。



(a)

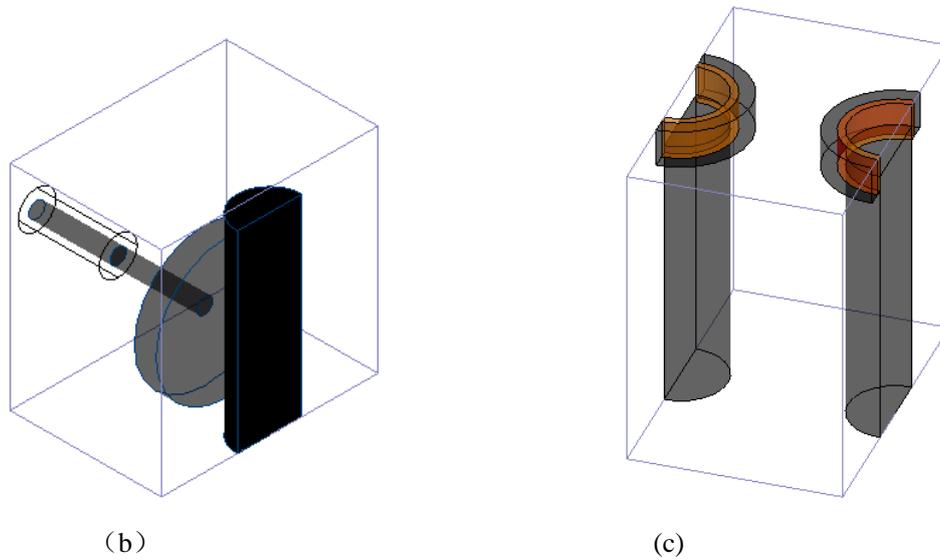
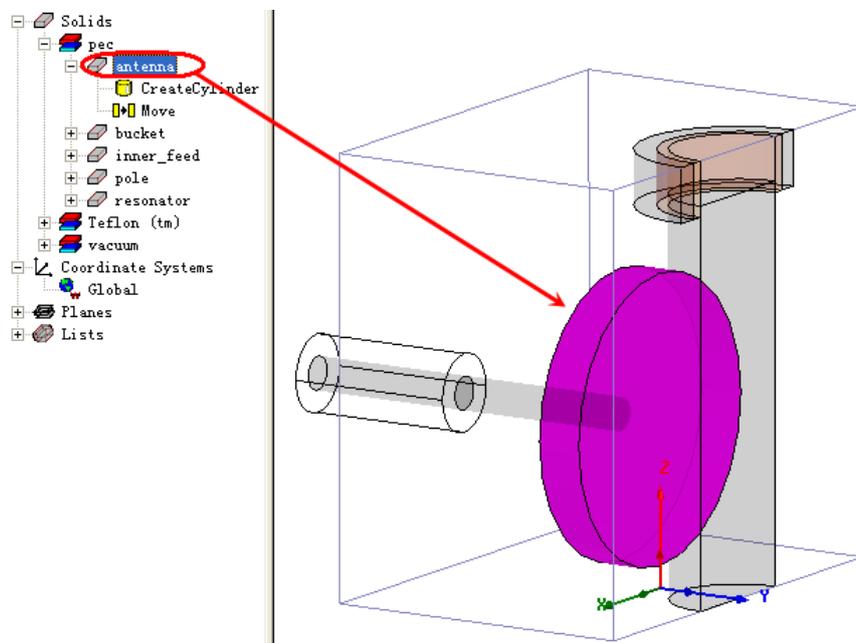


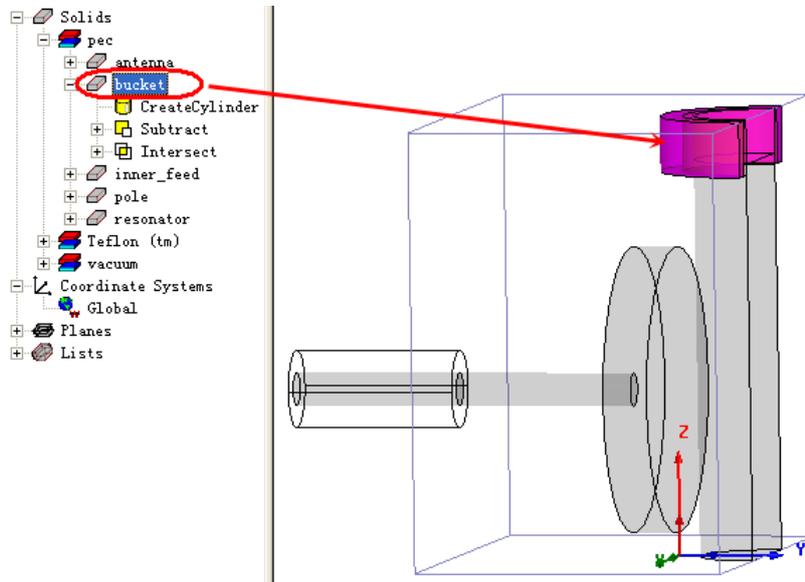
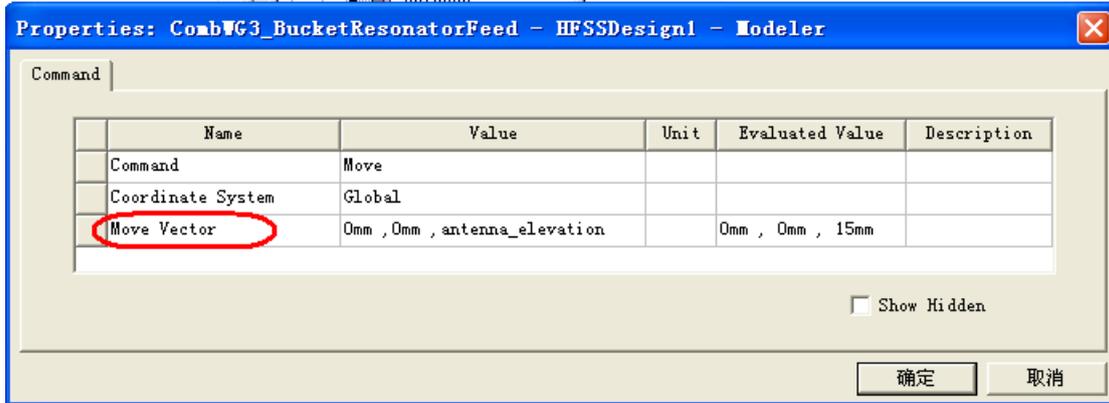
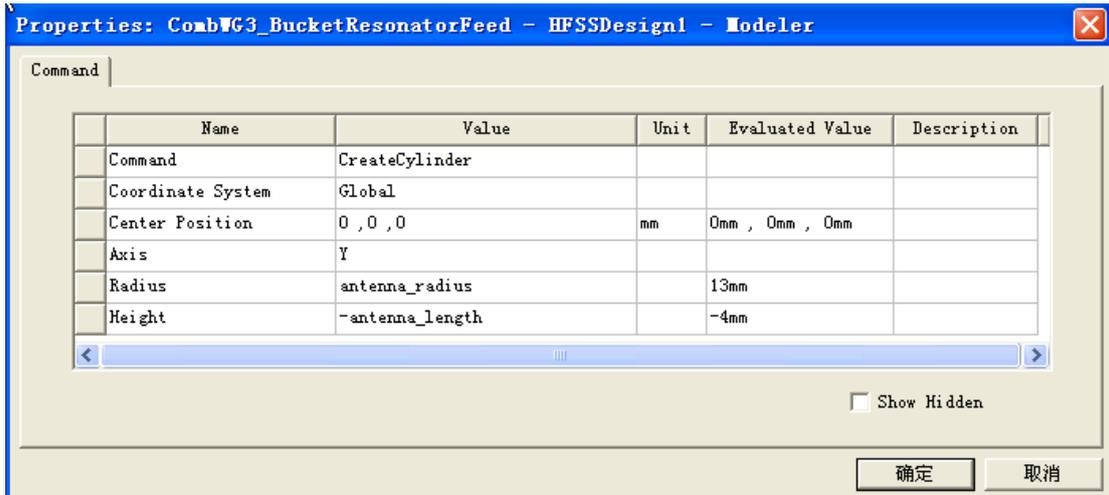
图 3

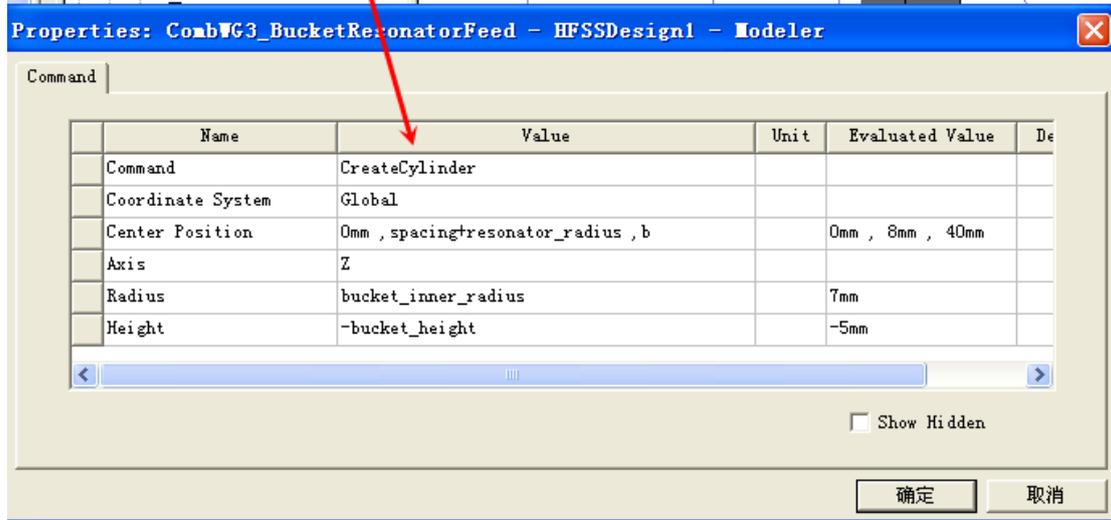
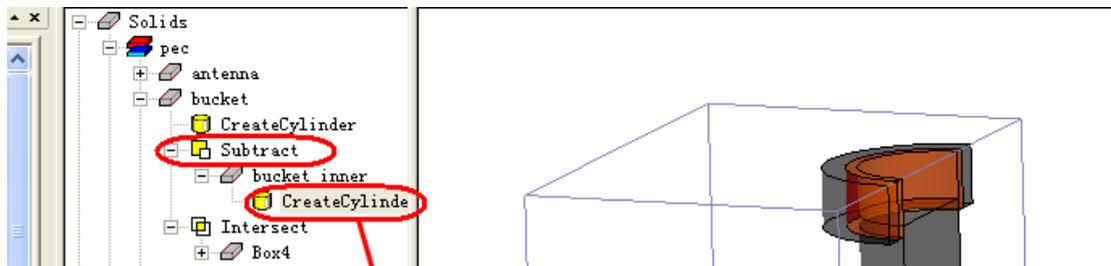
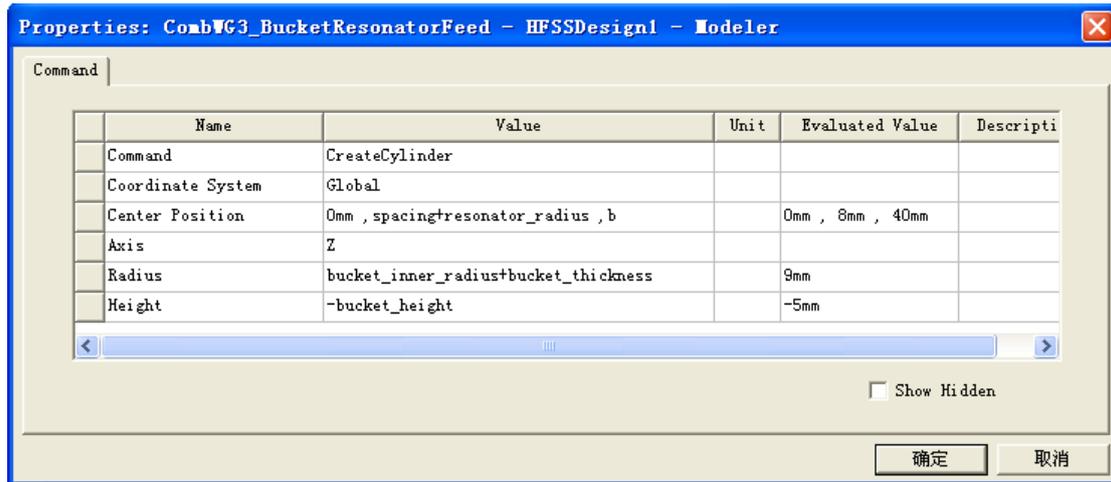
我们先对图 3 (b) 进行建模，考虑到后面要对模型进行优化的需要，最好一开始就采用参数化建模，HFSSv9 之后的版本都可以方便的支持全参数建模。首先将一系列的关键尺寸添加为变量。

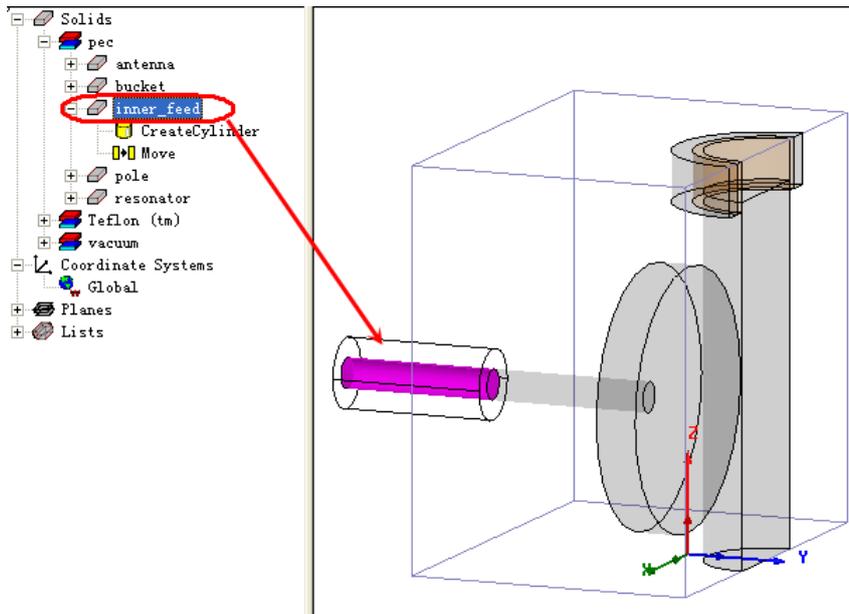
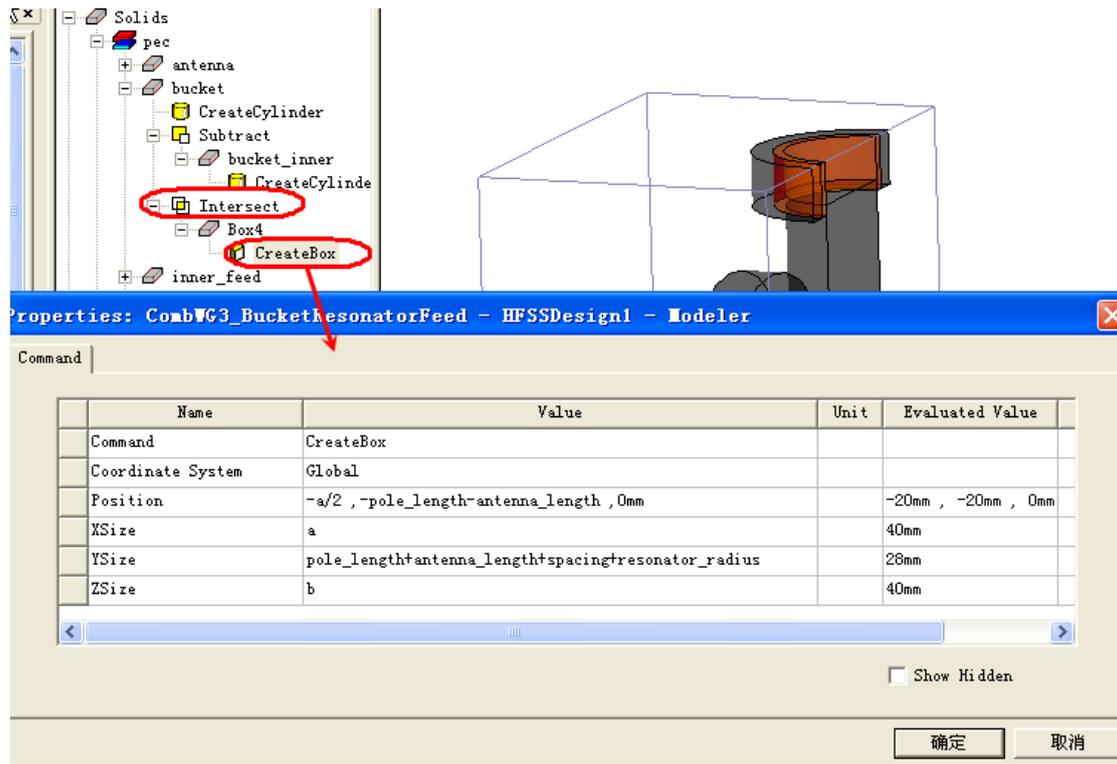
考虑到在 H 平面上波导器件可能有 U 型拐弯，因此这里不采用对称边界的方式建模，设计者可根据自己的情况选择是否采用对称平面以缩小求解空间。

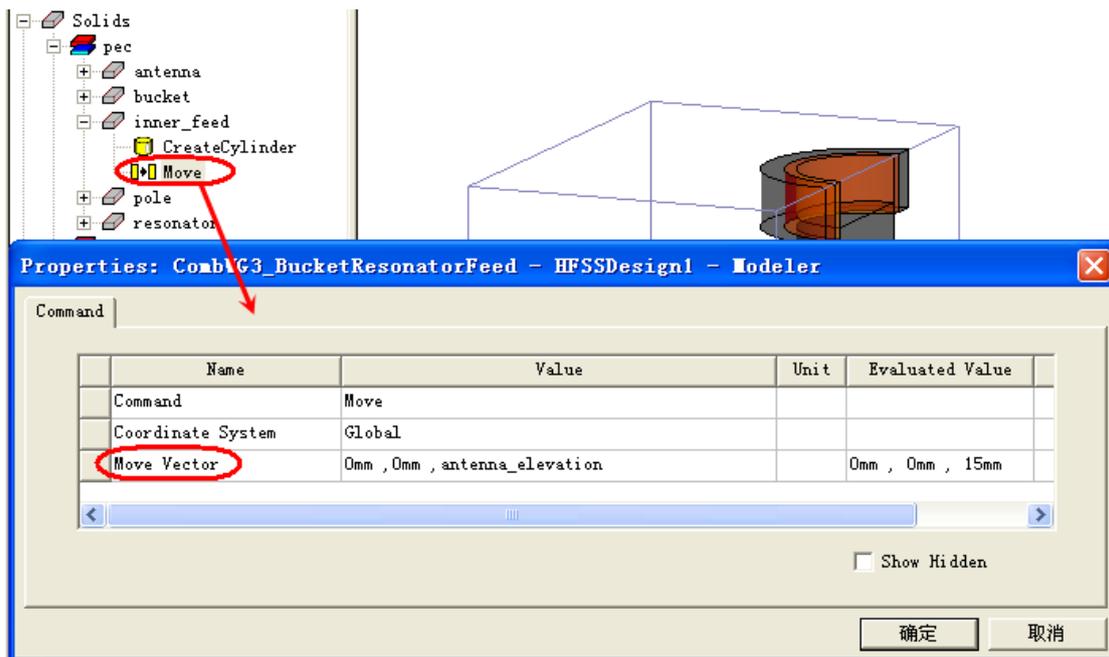
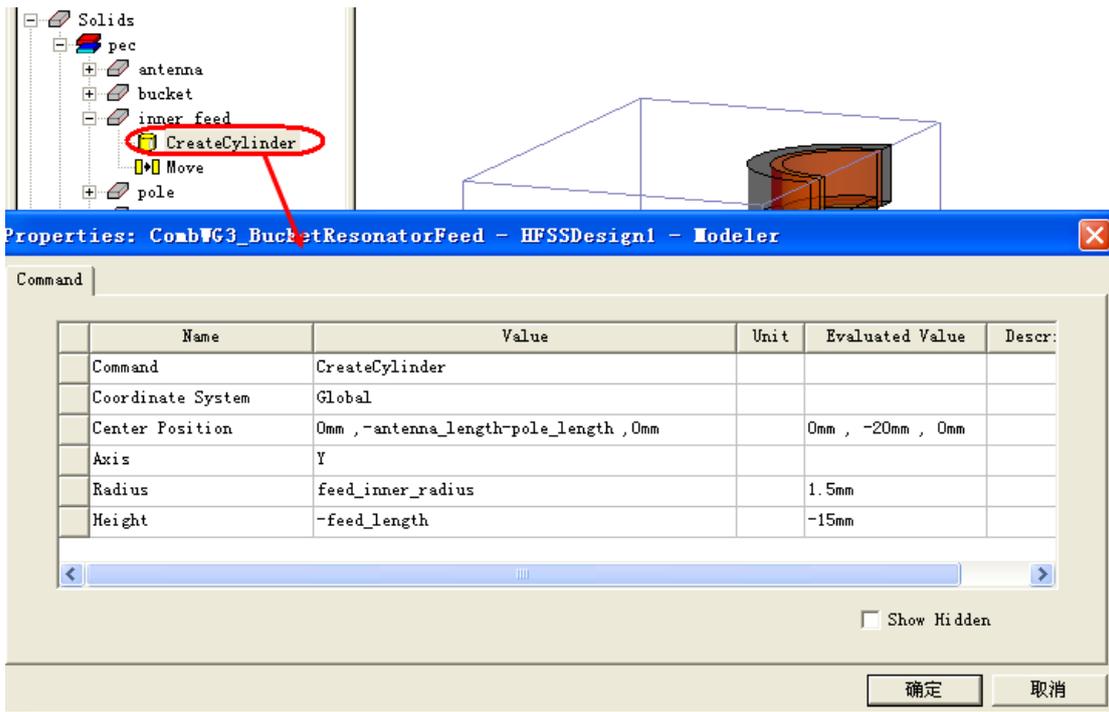
然后对图 3 (b) 中的结构分部件建模如下，我们将它命名为 Bucket-Resonator-feed.hfss:

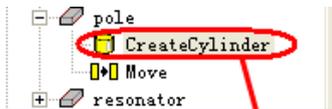
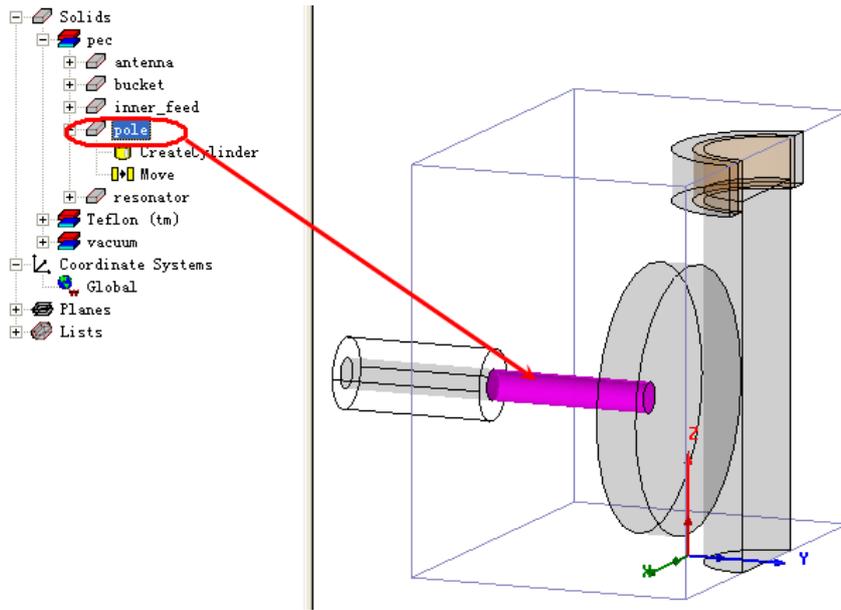












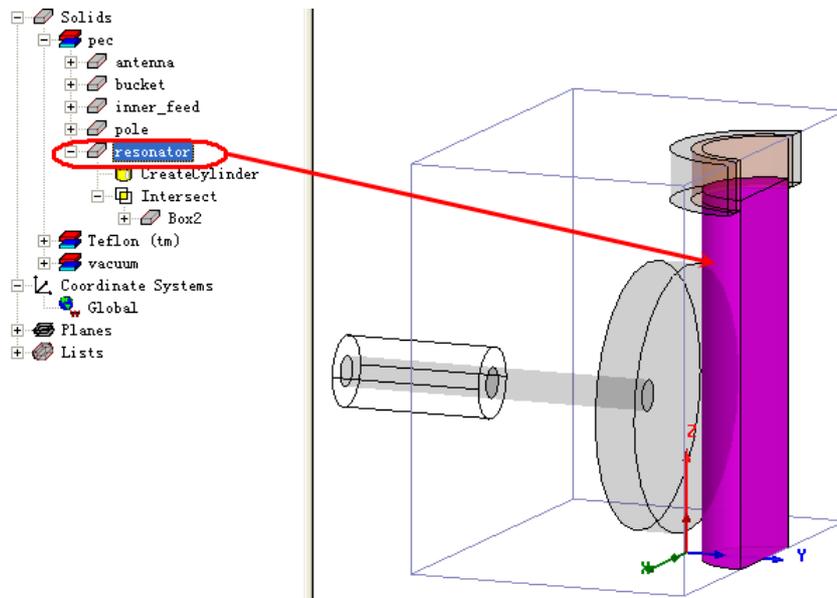
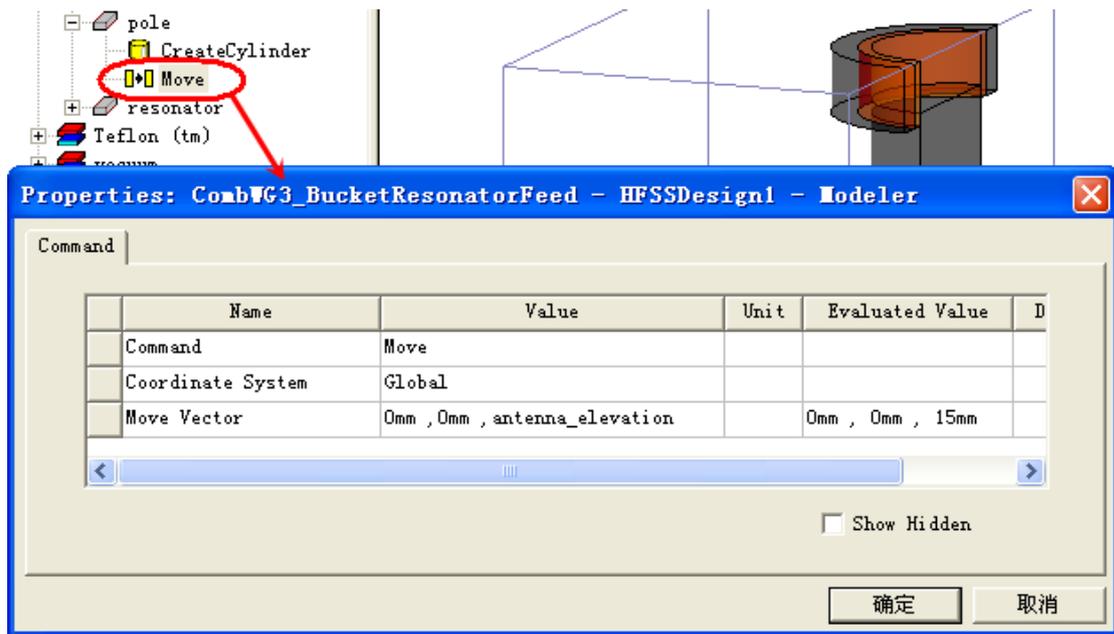
Properties: CombWGC_BucketResonatorFeed - HFSSDesign1 - Modeler

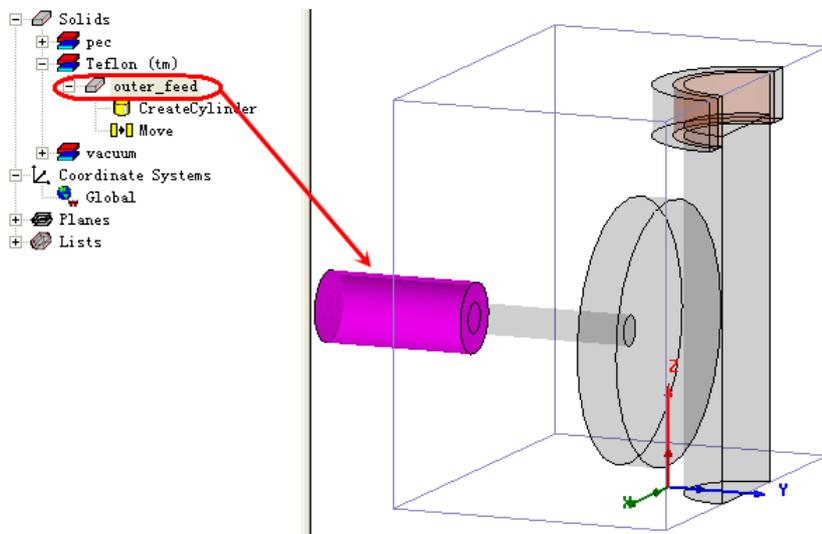
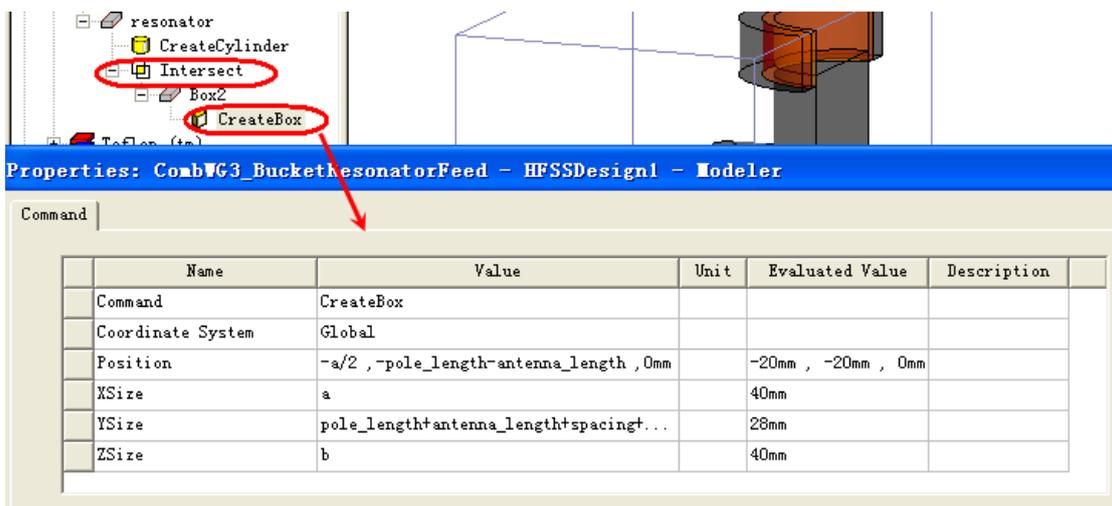
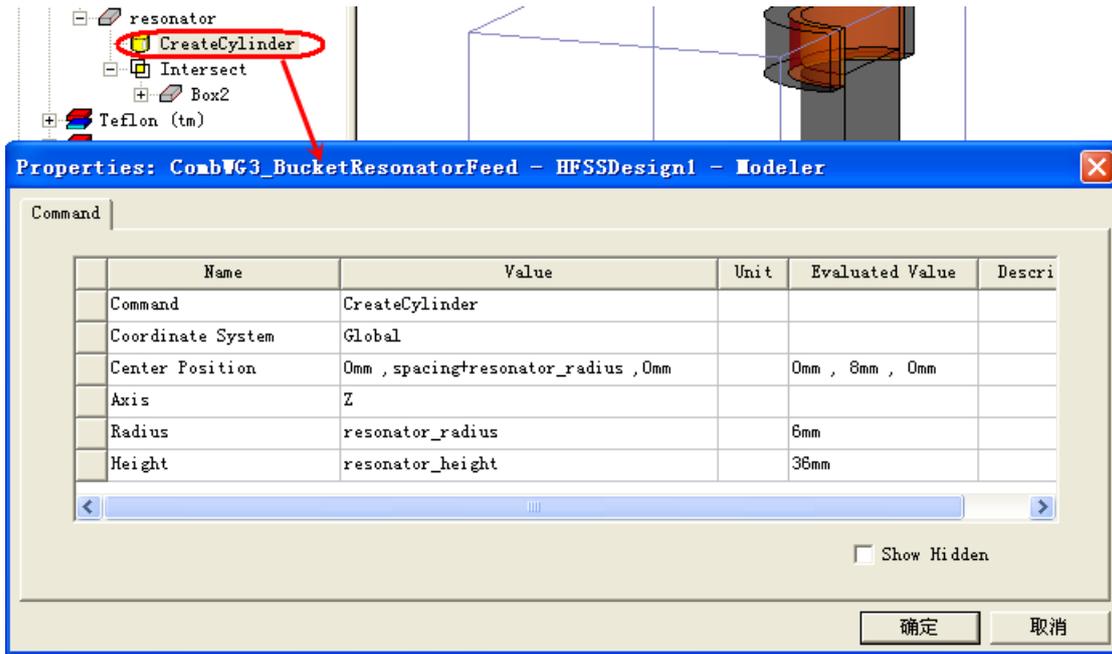
Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Descr
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , -antenna_length , 0mm		0mm , -4mm , 0mm	
Axis	Y			
Radius	pole_radius		1.5mm	
Height	-pole_length		-16mm	

Show Hidden

确定 取消





Properties: CombW3_BucketResonatorFeed - HFSSDesign1 - Modeler

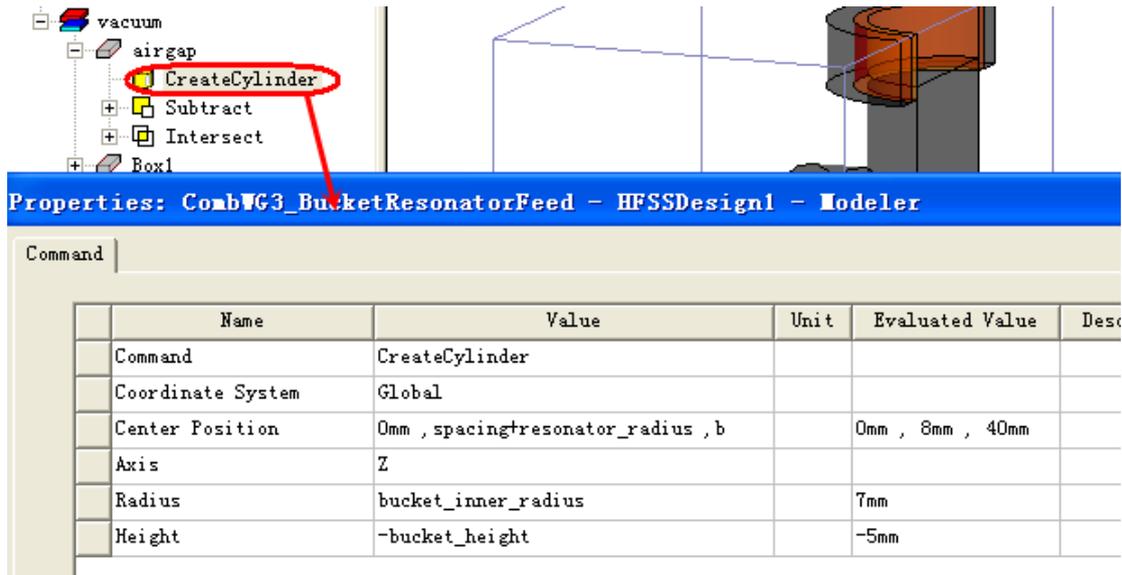
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Des
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , -antenna_length-pole_length , 0mm		0mm , -20mm , 0mm	
Axis	Y			
Radius	feed_outer_radius		3.5mm	
Height	-feed_length		-15mm	

Properties: CombW3_BucketResonatorFeed - HFSSDesign1 - Modeler

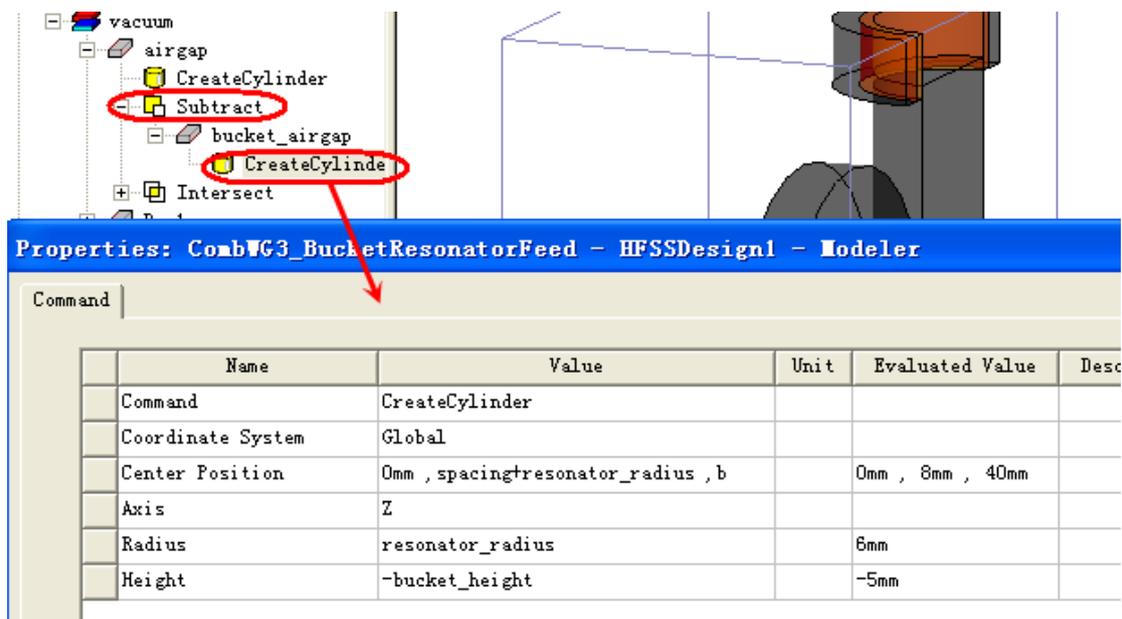
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Descript
Command	Move			
Coordinate System	Global			
Move Vector	0mm , 0mm , antenna_elevation		0mm , 0mm , 15mm	

Solids

- pec
- Teflon (tm)
- vacuum
 - airgap
 - CreateCylinder
 - Subtract
 - Intersect
 - Box1
- Coordinate Systems
 - Global
- Planes
- Lists



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , spacingresonator_radius , b		0mm , 8mm , 40mm	
Axis	Z			
Radius	bucket_inner_radius		7mm	
Height	-bucket_height		-5mm	



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , spacingresonator_radius , b		0mm , 8mm , 40mm	
Axis	Z			
Radius	resonator_radius		6mm	
Height	-bucket_height		-5mm	

Properties: CombWG3_BucketResonatorFeed - HFSSDesign1 - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateBox		
Coordinate System	Global		
Position	-a/2 , -pole_length-antenna_length , 0mm		-20mm , -20mm , 0mm
XSize	a		40mm
YSize	pole_length+antenna_length+spacing+resonator_radius		26mm
ZSize	b		40mm

Solids

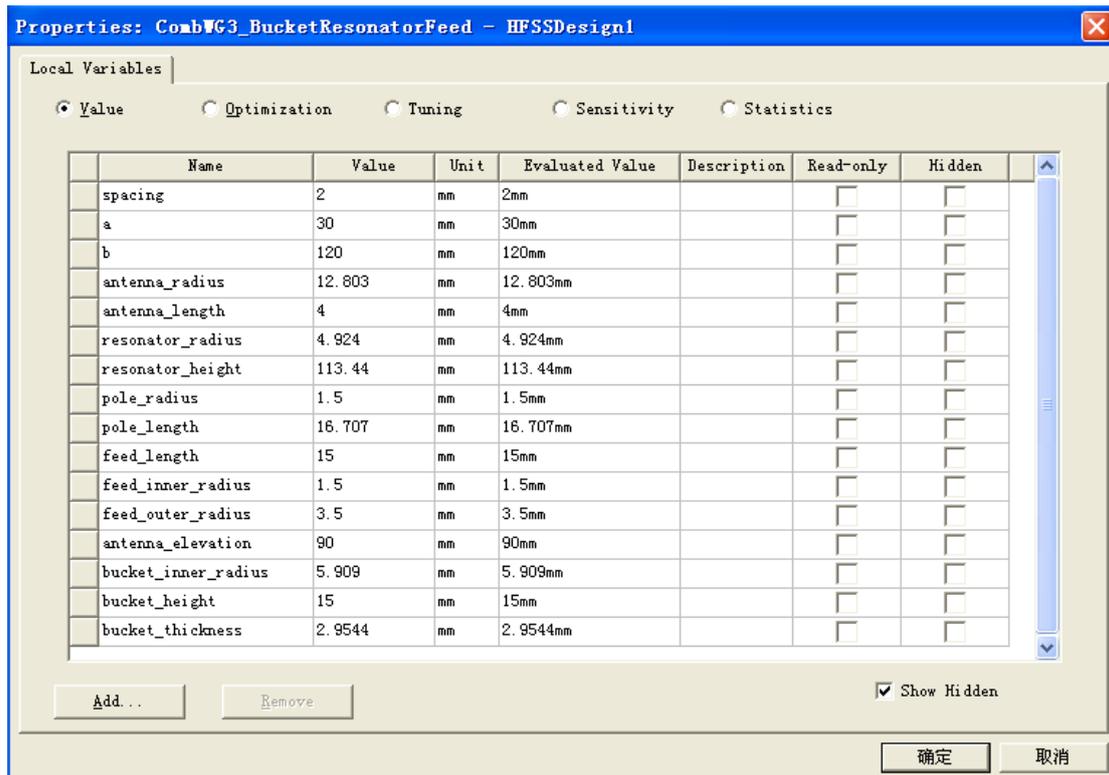
- pec
- Teflon (tm)
- vacuum
- airgap
- Box1**
- CreateBox

Coordinate Systems

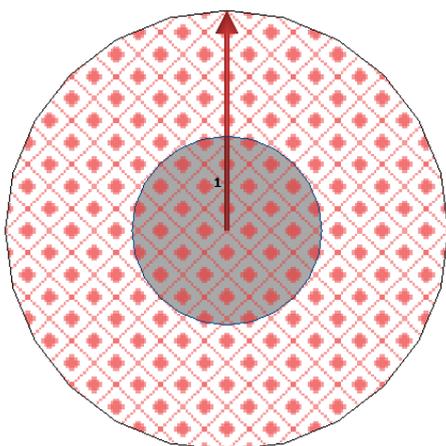
- Global

Planes

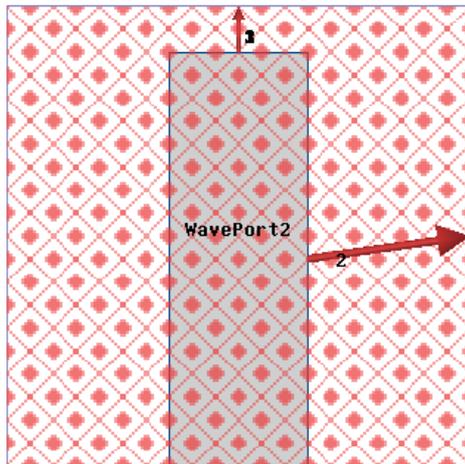
Lists



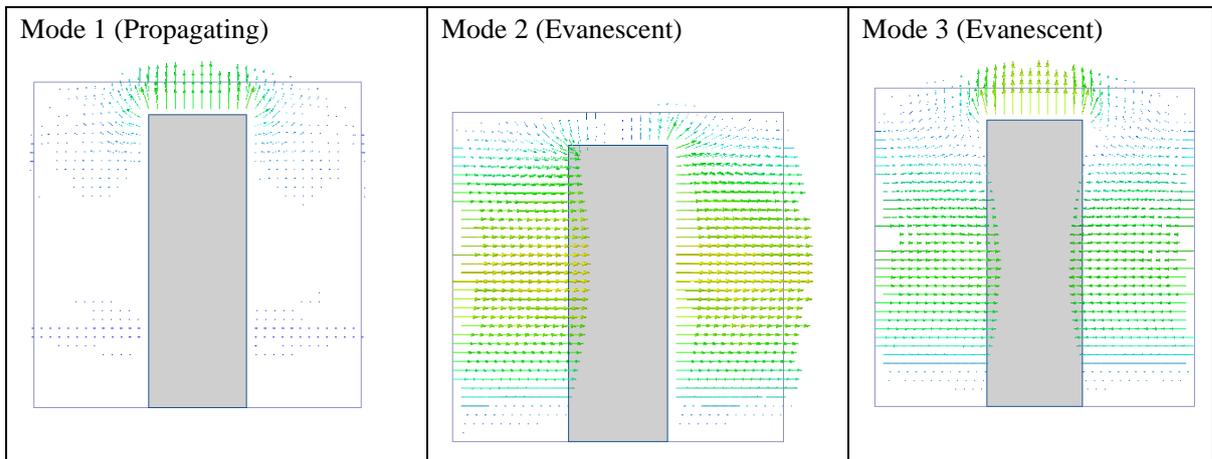
在对于图 3 (b) 中的结构完成了以上的建模工作后，我们将设置两个 Waveport。Waveport1 是一个典型的同轴端口，定义方法如下所示，图中的积分线从同轴端口截面的内径指向外径，可作为 S 参数的参考 0 相位。在 HFSSv11 中，即便是同轴端口的填充介质的材料特性和尺寸也可以作为变量传递到 Ansoft Designer，从而完全实现滤波器的参数化设计。



Waveport2 可看作一个单脊波导的截面。对于这种端口，我们至少需要求解主模和两个消逝模式才能得到足够精度的结果。我们知道，每个 waveport 都可看作传输线的横截面，HFSS 在计算端口特征阻抗时有三种方式— Z_{pi} 、 Z_{pv} 和 Z_{vi} （详见 onlinehelp），使用者可以根据不同的传输线类型选择相应的端口阻抗的归一化计算方式。这里我们可以选择 Z_{pv} 方式计算端口阻抗，并且对于每种传输模式定义积分线表明该模式的电场方向。



Freq	Port Zo	Gamma	Lambda	Epsilon
3 (GHz)	WavePort1:1 (35.205, 0.0286)	(91.115, 90)	0.068959	2.1
	WavePort2:1 (65.931, 0)	(58.072, 90)	0.1082	0.85304
	WavePort2:2 (187.25, 90)	(40.792, 0)	0	0
	WavePort2:3 (18.671, 90)	(60.033, 0)	0	0



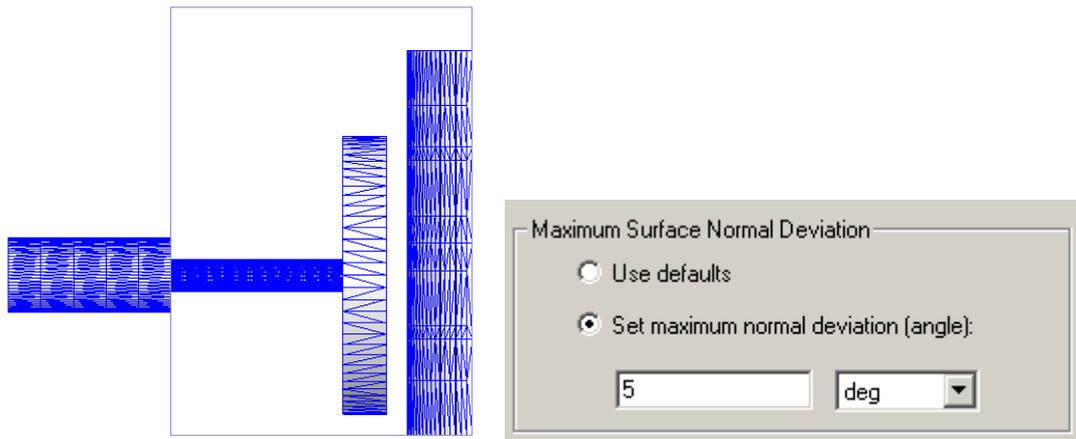
从仿真结果来看，waveport2 的 Mode 3 与 waveport1 和 waveport2 传输主模间的模式转换分别为 -17.7 dB 和 -19.5 dB，因此根据工程上小于 -20 dB 的模式耦合才能够忽略不计的经验值来看，Mode 3 是不能忽略不计的。但是 Mode 2 与 waveport1 和 waveport2 间的模式转换却微乎其微，由于 HFSS 中的端口模式是从主模到高次模依次排列的，通常要求解 waveport2 的 Mode 3 就需要同时先求解 Mode 2 才行。从求解过程来看，waveport2 的 Mode 2 的模式转换分别只有 -82.5dB、-67.9 dB 和 -72.3 dB，因此收敛起来较困难。

想要规避这一问题有个巧妙的方法，就是设置 Symmetry H 边界条件。因为 waveport2 的 Mode 1 和 Mode3 都是 H 平面的对称模式，而 Mode 2 是非对称模式。在 HFSS 中，对称边界条件可将关于边界不对称的模式滤除，从而省略了对 Mode 2 的求解，这就相当于消除了求解收敛过程中的“短木桶”。然而，有时候从工程的角度出发，在 H 平面上波导有

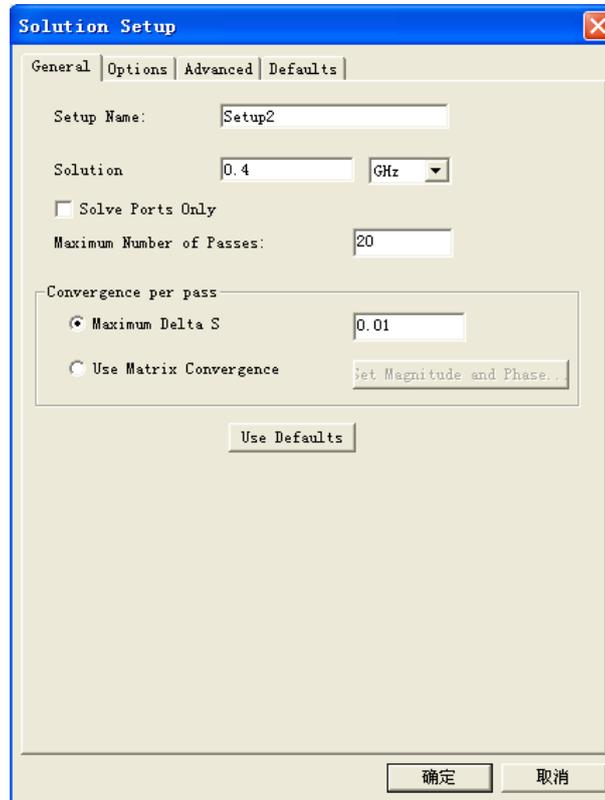
U 型拐弯，因此 Symmetry H 不是经常适用的。

Freq		S:WavePort1:1	S:WavePort2:1	S:WavePort2:2	S:WavePort2:3
3 [GHz]	WavePort1:1	-0.314	-11.7	-82.5	-19.5
	WavePort2:1	-11.7	-0.301	-67.9	-17.7
	WavePort2:2	-82.5	-67.9	-16.8	-72.3
	WavePort2:3	-19.5	-17.7	-72.3	-18.6

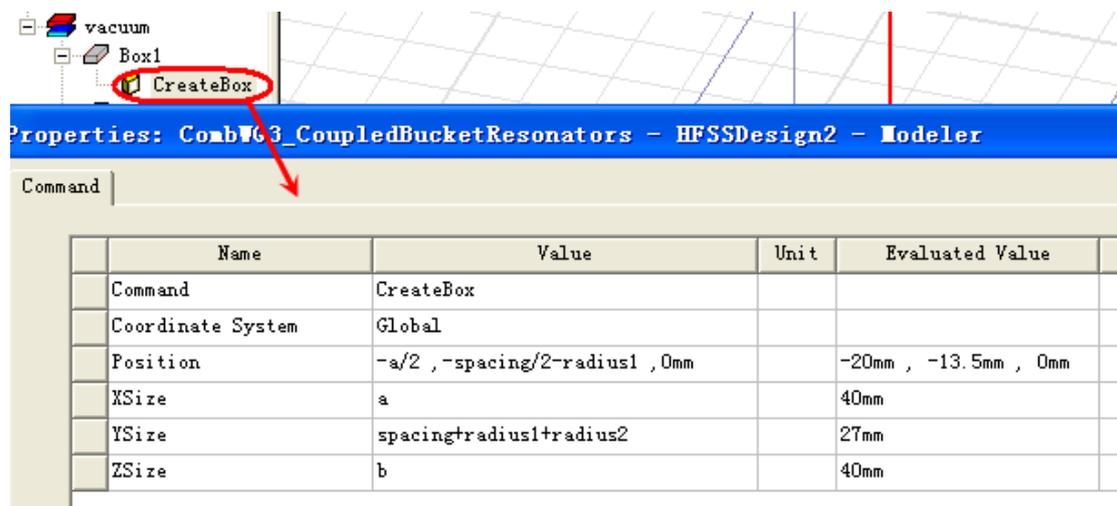
为了收敛的更快，我们可在如下所示的表面上设置手动网格剖分，从而获得更加高质量的初始网格。

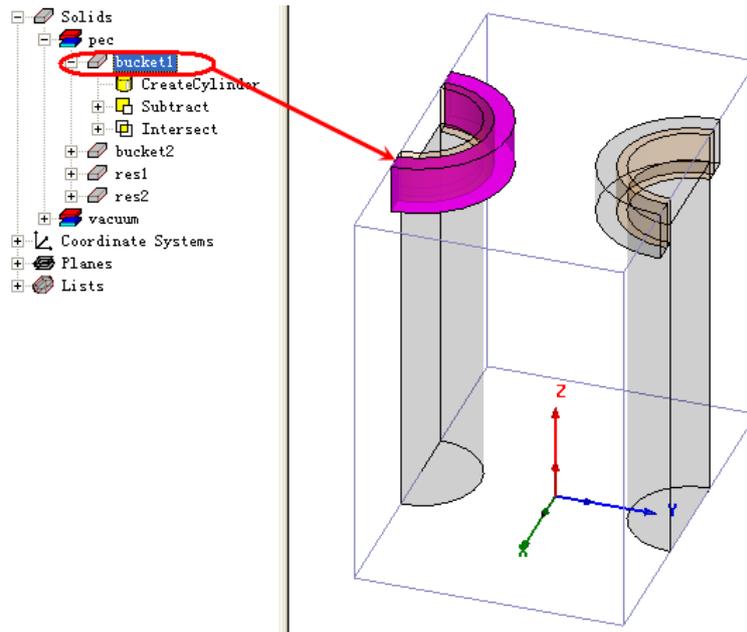


在求解设置部分可参考前述 IRIS 波导滤波器的设置，所不同的是求解频率为 0.4GHz



接下来，我们对图 3 (c) 中的基本单元进行建模，我们将它命名为 Coupled-Bucket-resonator.hfss。

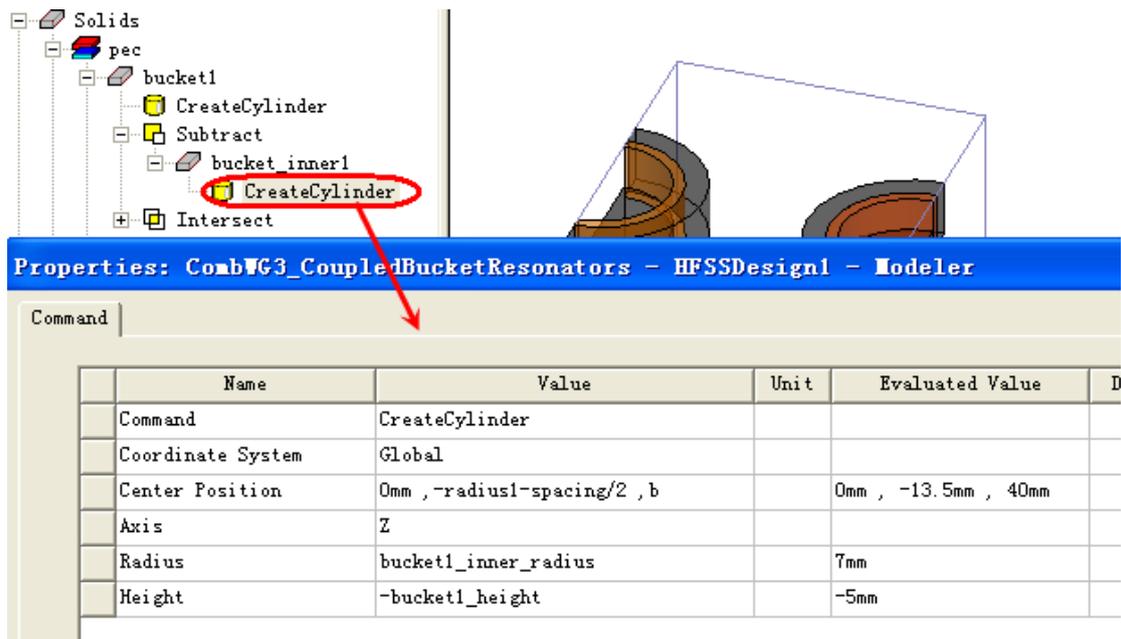




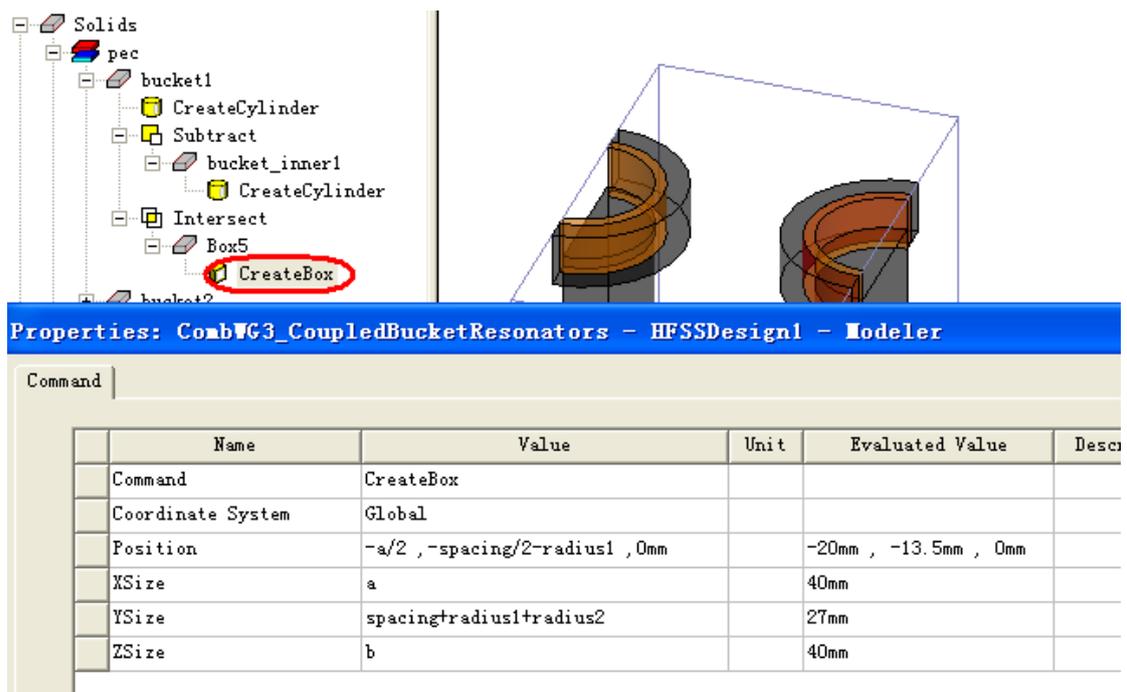
Properties: CombW3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

Command

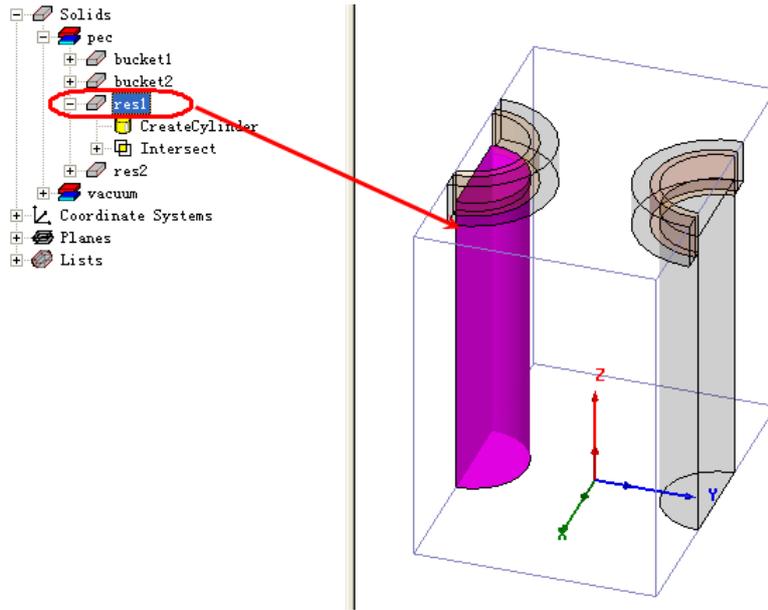
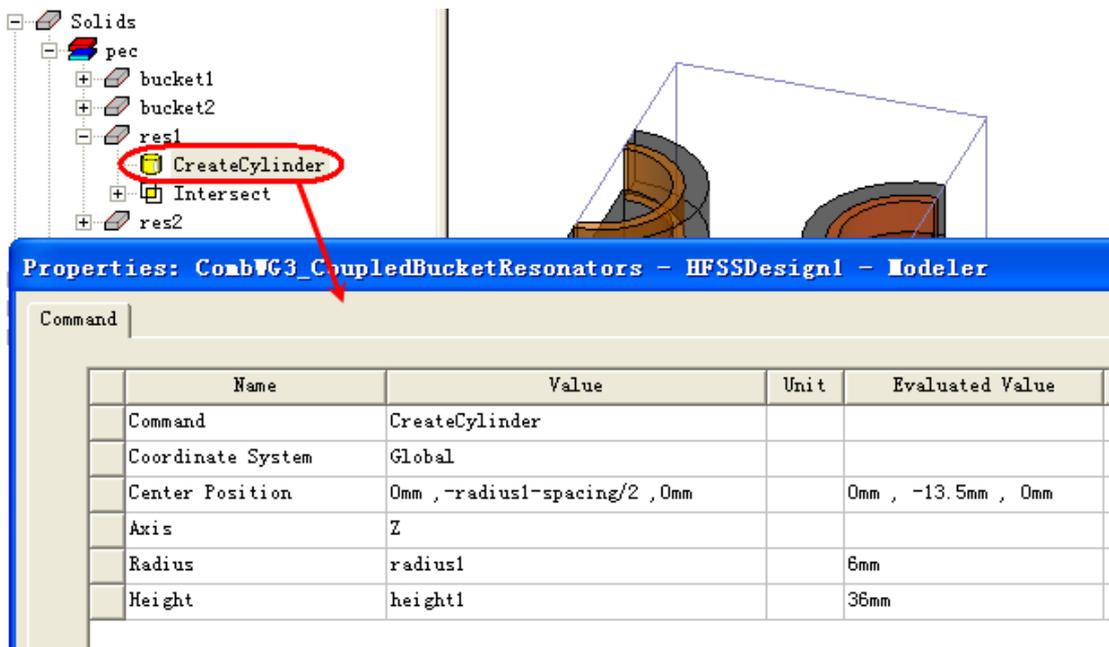
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate System	Global		
Center Position	0mm , -radius1-spacing/2 , b		0mm , -13.5mm , 40mm
Axis	Z		
Radius	bucket1_inner_radius+bucket1_thickness		9mm
Height	-bucket1_height		-5mm



Name	Value	Unit	Evaluated Value	D
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , -radius1-spacing/2 , b		0mm , -13.5mm , 40mm	
Axis	Z			
Radius	bucket1_inner_radius	7mm		
Height	-bucket1_height	-5mm		



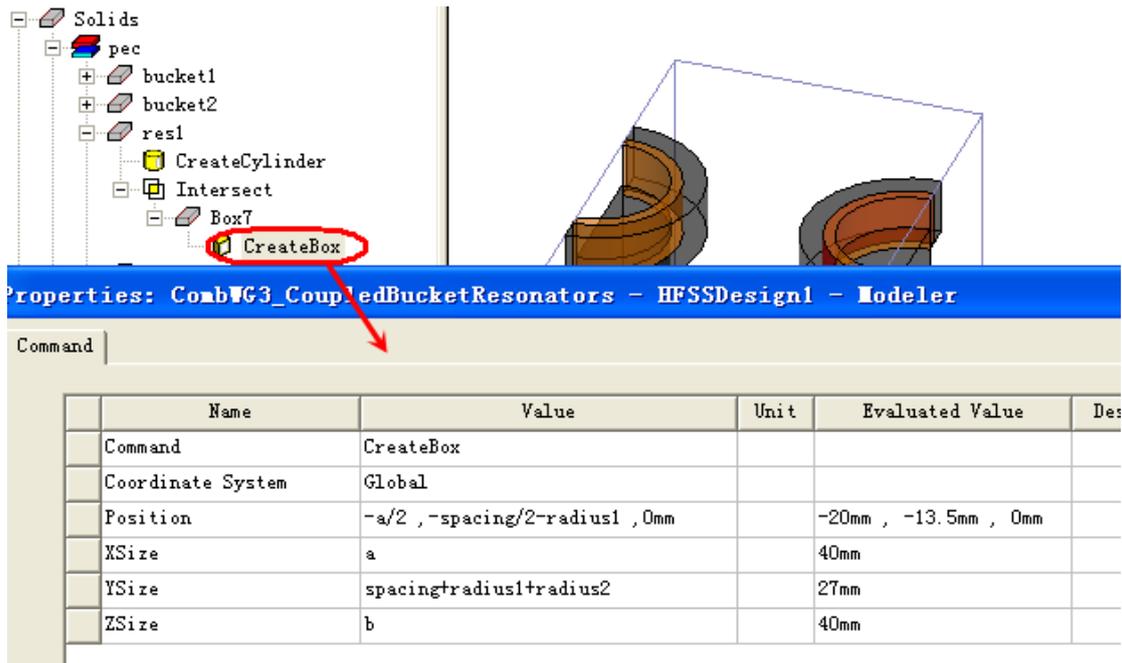
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Descr
Command	CreateBox			
Coordinate System	Global			
Position	-a/2 , -spacing/2-radius1 , 0mm		-20mm , -13.5mm , 0mm	
XSize	a	40mm		
YSize	spacing+radius1+radius2	27mm		
ZSize	b	40mm		

Properties: CombWG3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

Command

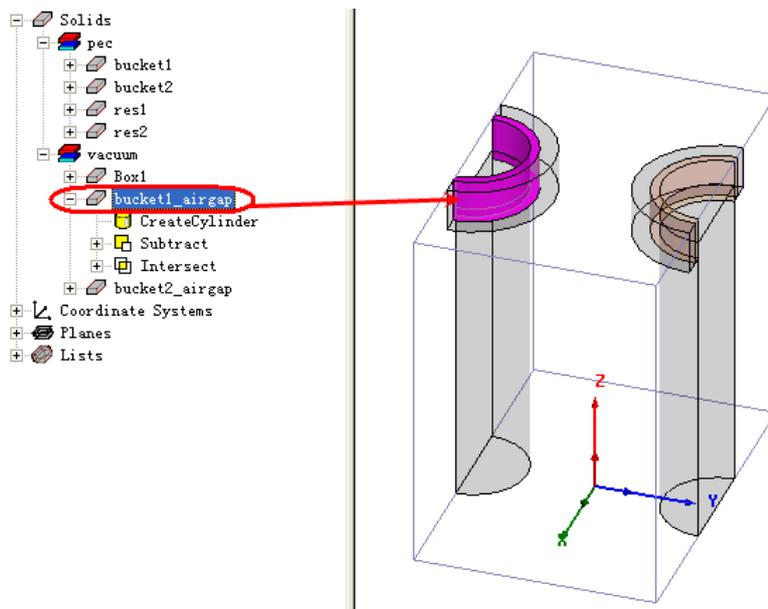
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate System	Global		
Center Position	0mm , -radius1-spacing/2 , 0mm		0mm , -13.5mm , 0mm
Axis	Z		
Radius	radius1		6mm
Height	height1		36mm



Properties: CombWG3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

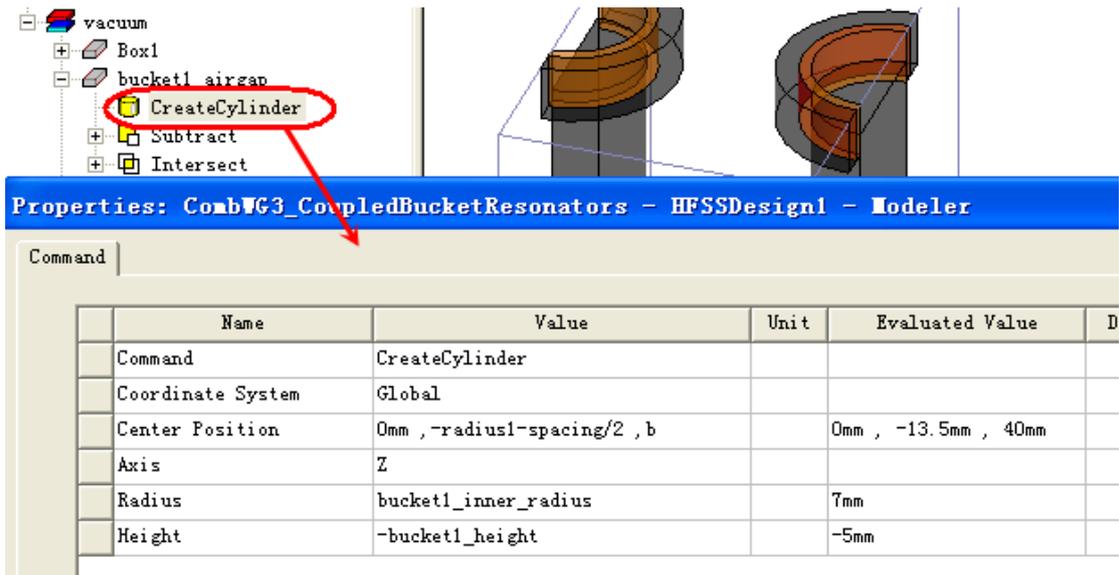
Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Des
Command	CreateBox			
Coordinate System	Global			
Position	$-a/2, -spacing/2-radius1, 0mm$		-20mm , -13.5mm , 0mm	
XSize	a		40mm	
YSize	$spacing+radius1+radius2$		27mm	
ZSize	b		40mm	



Solids

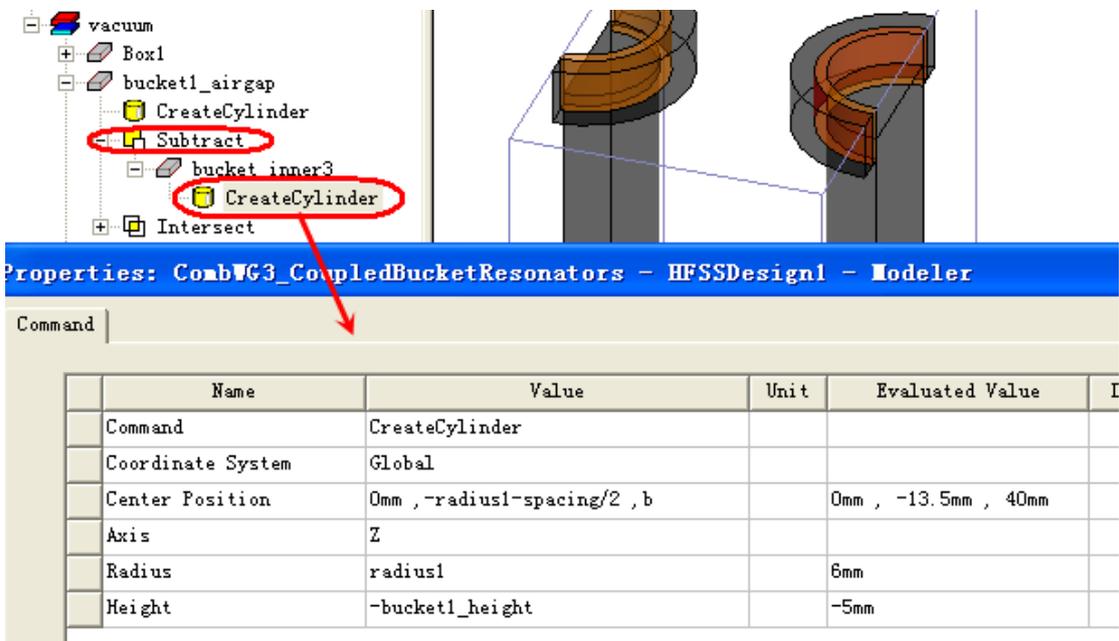
- pec
 - bucket1
 - bucket2
 - res1
 - res2
 - vacuum
 - Box1
 - bucket1_airgap
 - bucket2_airgap
- Coordinate Systems
- Planes
- Lists



Properties: CombWG3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	D
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , -radius1-spacing/2 , b		0mm , -13.5mm , 40mm	
Axis	Z			
Radius	bucket1_inner_radius	7mm		
Height	-bucket1_height	-5mm		



Properties: CombWG3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	I
Command	CreateCylinder			
Coordinate System	Global			
Center Position	0mm , -radius1-spacing/2 , b		0mm , -13.5mm , 40mm	
Axis	Z			
Radius	radius1	6mm		
Height	-bucket1_height	-5mm		

vacuum

- Box1
- bucket1_airgap
 - CreateCylinder
 - Subtract
 - Intersect**
 - Box8
 - CreateBox**

Properties: CombWG3_CoupledBucketResonators - HFSSDesign1 - Modeler

Command

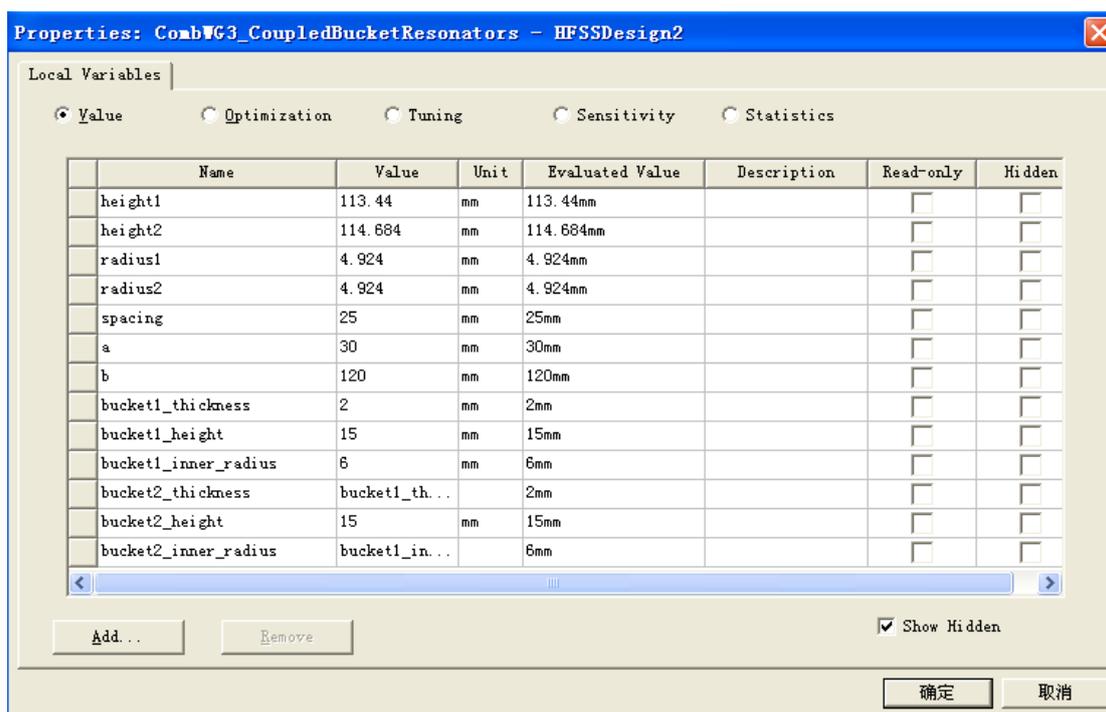
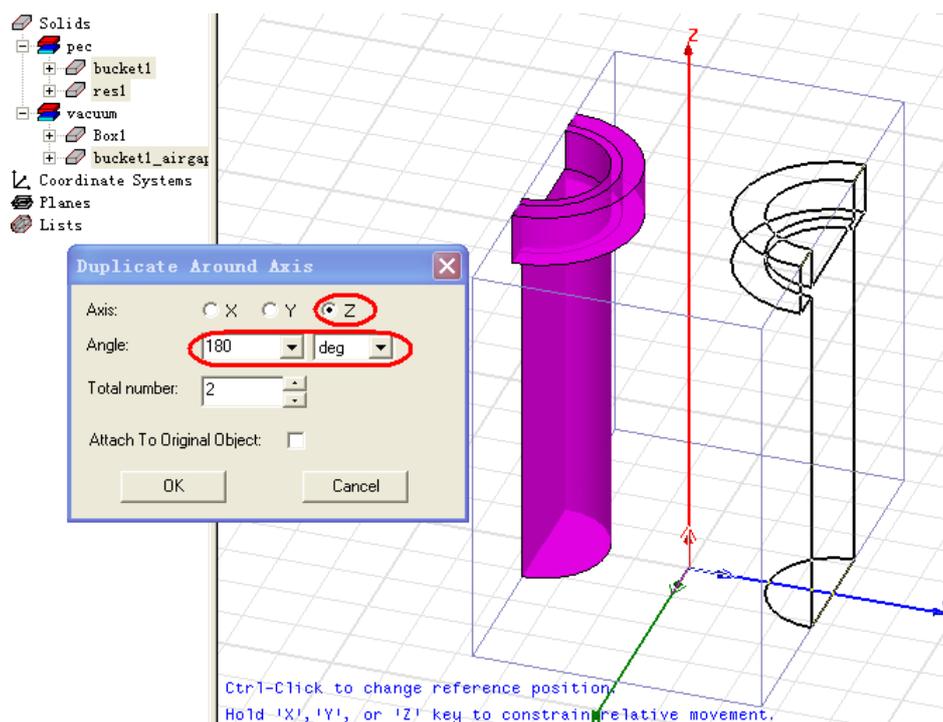
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateBox		
Coordinate System	Global		
Position	$-a/2, -spacing/2 - radius1, 0mm$		-20mm , -13.5mm , 0mm
XSize	a		40mm
YSize	$spacing + radius1 + radius2$		27mm
ZSize	b		40mm

Solids

- pec
 - bucket1
 - res1
- vacuum
 - Box1
 - bucket1_airgap
- Coordinate Systems
- Planes
- Lists

Context Menu:

- Escape Pan Mode Esc
- Select Objects O
- Select Faces F
- Select Edges E
- Select Vertices V
- Select Multi M
- Next Behind B
- All Object Faces
- Faces On Plane
- Measure
- View
- Edit
 - Copy Ctrl+C
 - Paste Ctrl+V
 - Delete Del
 - Properties...
 - Arrange
 - Duplicate
 - Along Line
 - Around Axis...**
 - Mirror
 - Scale
 - Surface



如此，图 3 (c)的建模工作就完成了。在端口定义方面，可参照图 3 (b)模型的 waveport2 定义方法。在求解设置方面，图 3(c)也可采用和(b)模型相同的求解设置。

2) 在 HFSS 中进行基本单元的参数化扫描

对于参数化扫描，HFSS 除了支持手工设置参数化扫描点的方式外，还可支持 DOE (Design On Experience) 的方式，后者可通过直接在数表中输入扫描点来自动生成相应的

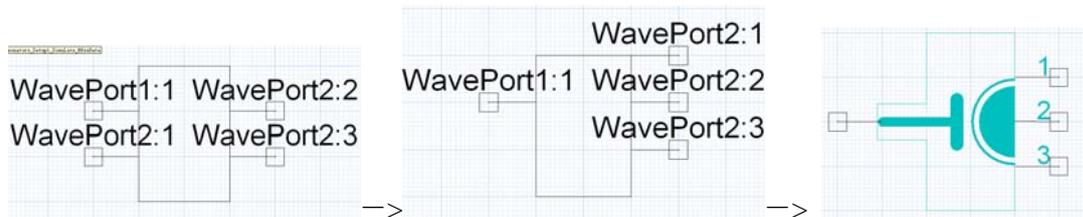
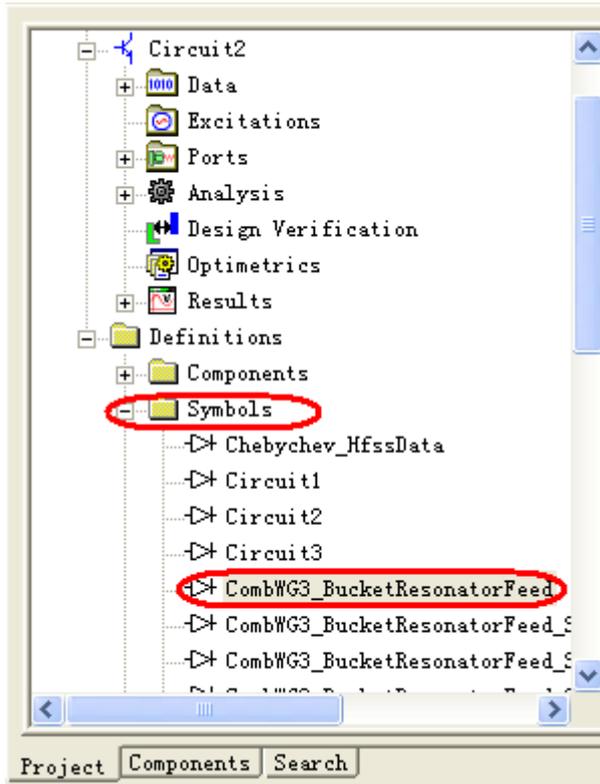
HFSS 参数化扫描设置，比较适合流程化的设计仿真。如前所述，我们可以分别对中间 3 根金属棒的长度 height2、两侧金属棒的长度 height1、金属棒间的距离 S1 和 S2 以及辐射器与外侧金属棒间的距离 pole-length 设置一系列参数化扫描。



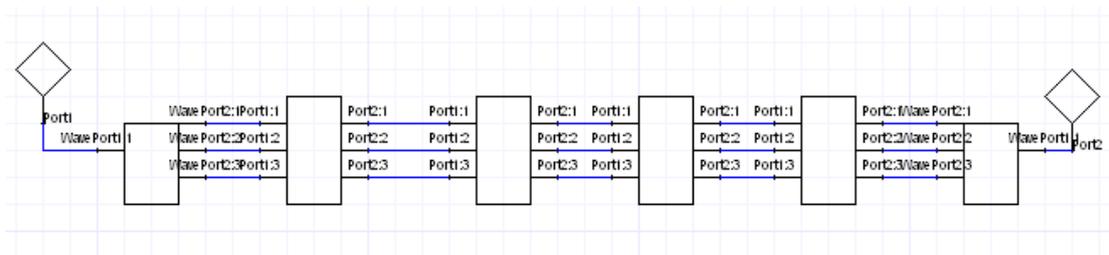
这些参数化扫描的结果将为优化设计提供基础数据，而优化的过程则是在 Ansoft Designer 的电路设计中完成的。

3) 建立 HFSS 与 Ansoft Designer 间的动态链接

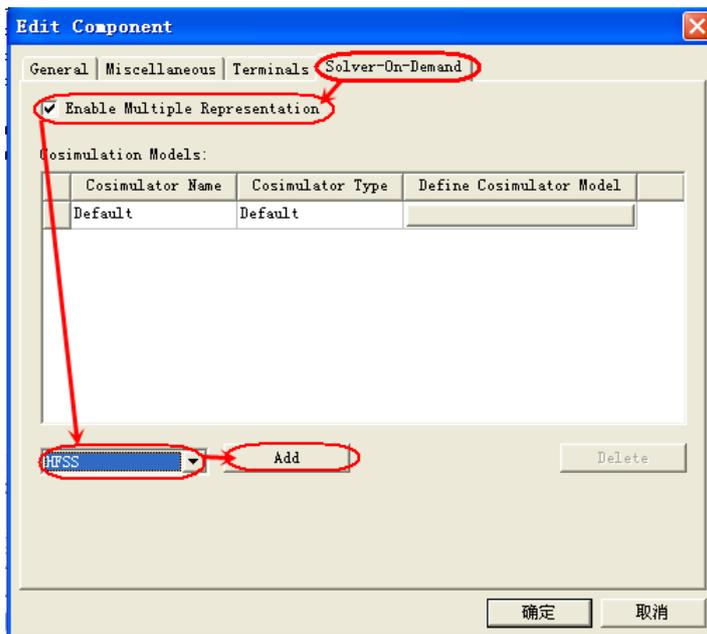
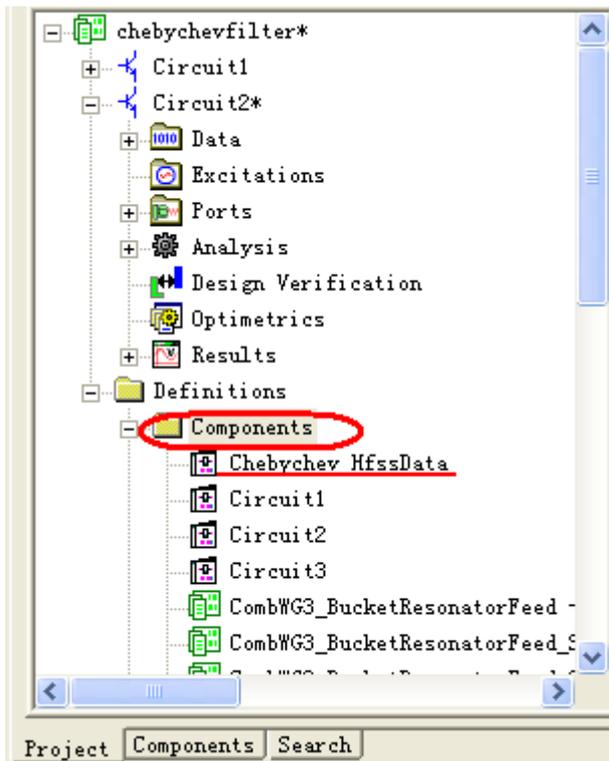
与例（一）中的操作相同，我们可通过在 ADE 的电路原理图设计中插入子电路的形式将 HFSS 中基本单元连接进来。由于 BucketResonatorFeed.hfss 的 waveport2 以及 Coupled-Bucket-Resonator.hfss 的两个 waveport 都分别包含了 3 个模式，因此当它以元件的形式导入电路设计时相应的 waveport 也会对应 3 个 Pin 脚。使用者可对 ADE 中的器件符号进行自由的编辑，因此为了连接电路的方便，我们可对 Pin 脚的位置做调整，并且还可为元件编辑更美观的符号。

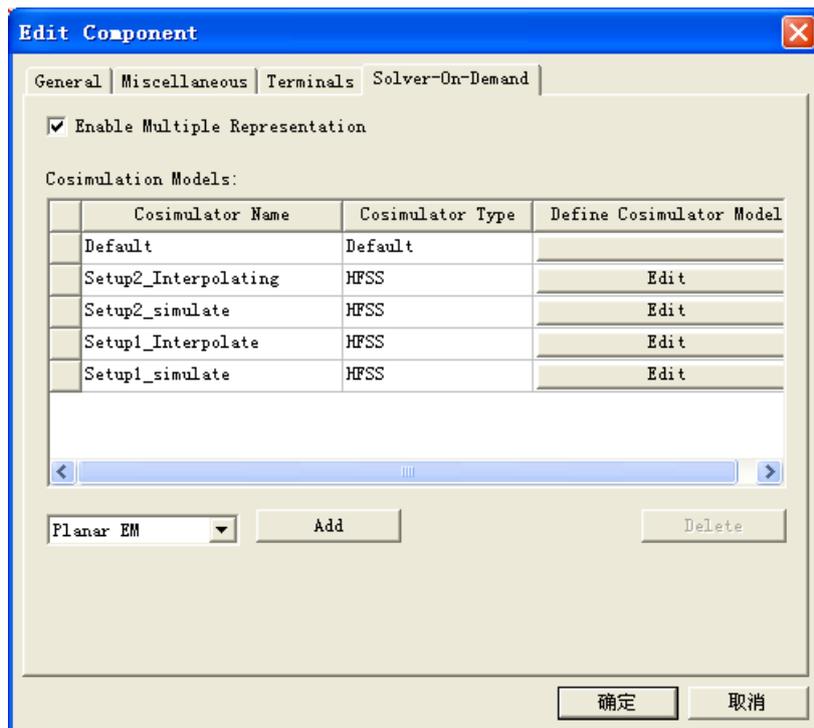
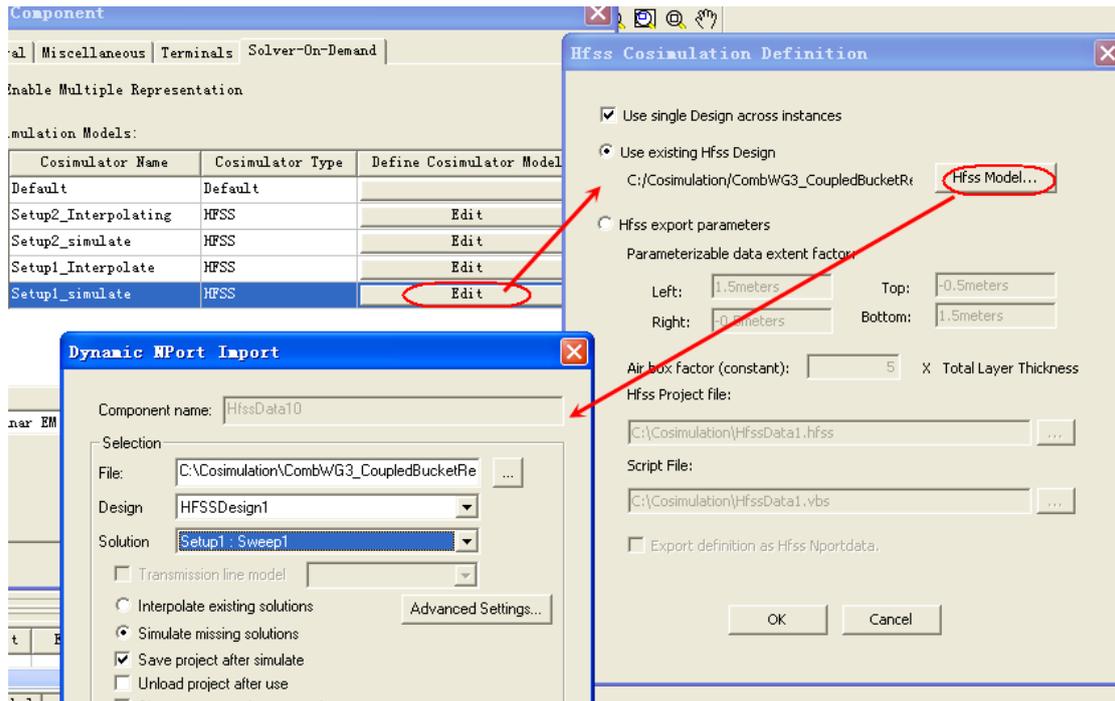


对元件 Pin 脚的位置进行调整后，得到如下图所示的电路原理图。

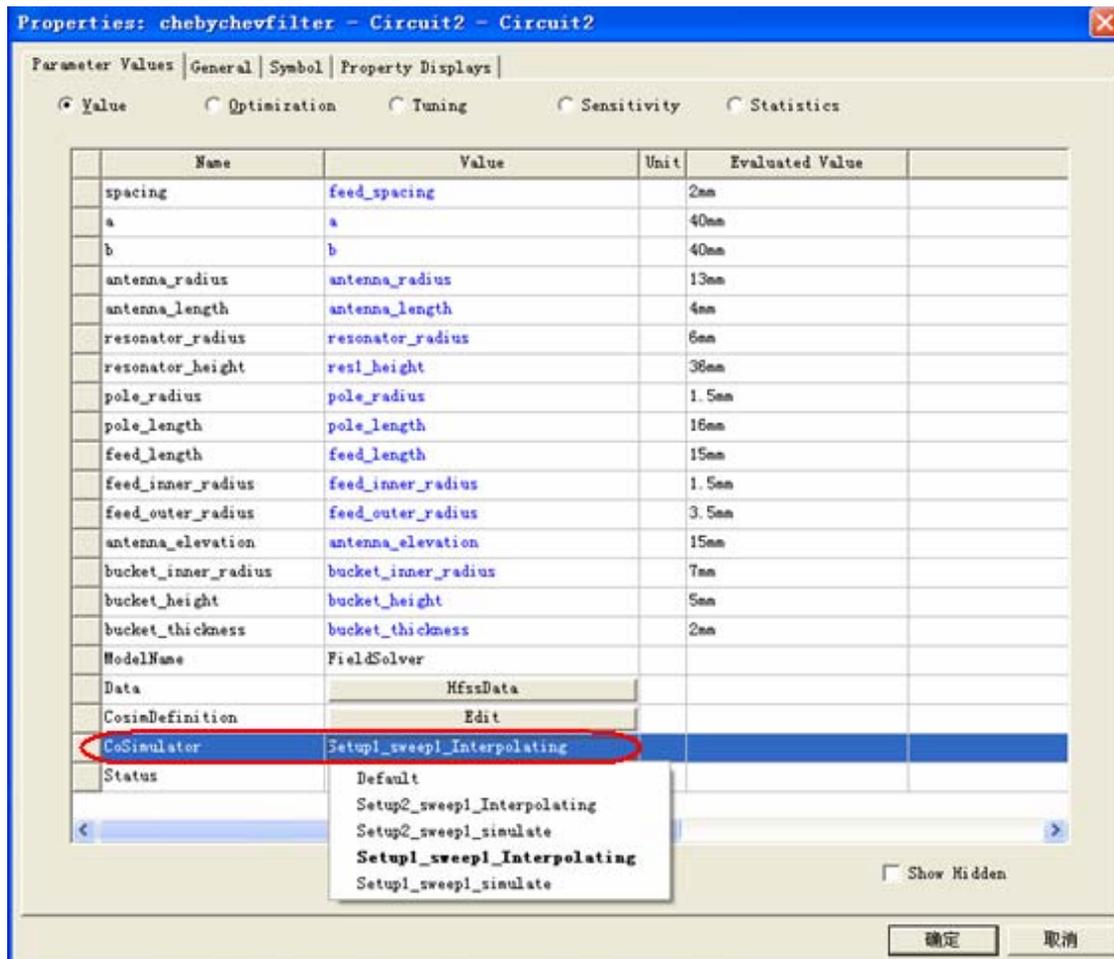


除此之外，我们还可以对每个元件设置协同仿真选项，操作如下：



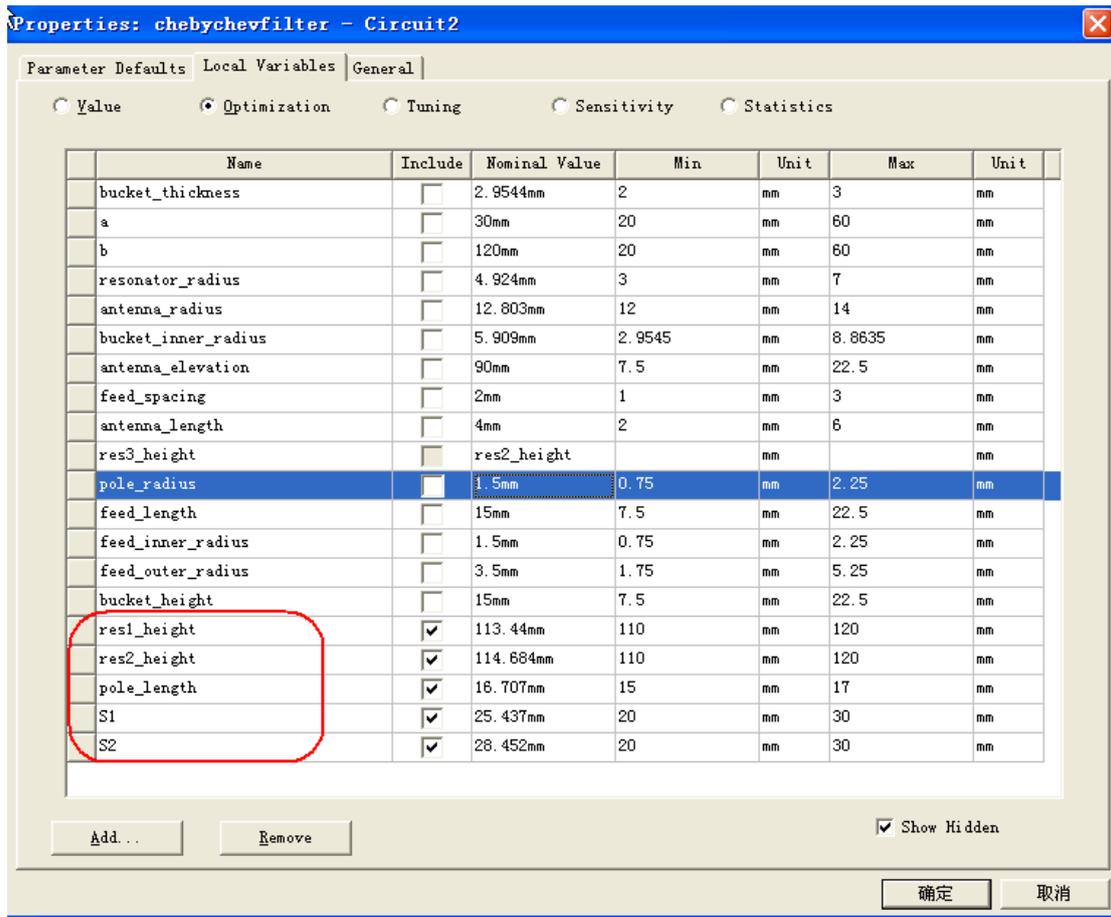


在元件的“Sover-On-Demand”项做了如上的设置之后，其属性栏就会出现“cosimulator”这一项，使用者可以在一系列的协同仿真设置中进行选择，比如，进行优化时，一般会选择对已有的仿真结果进行插值“interpolating”。

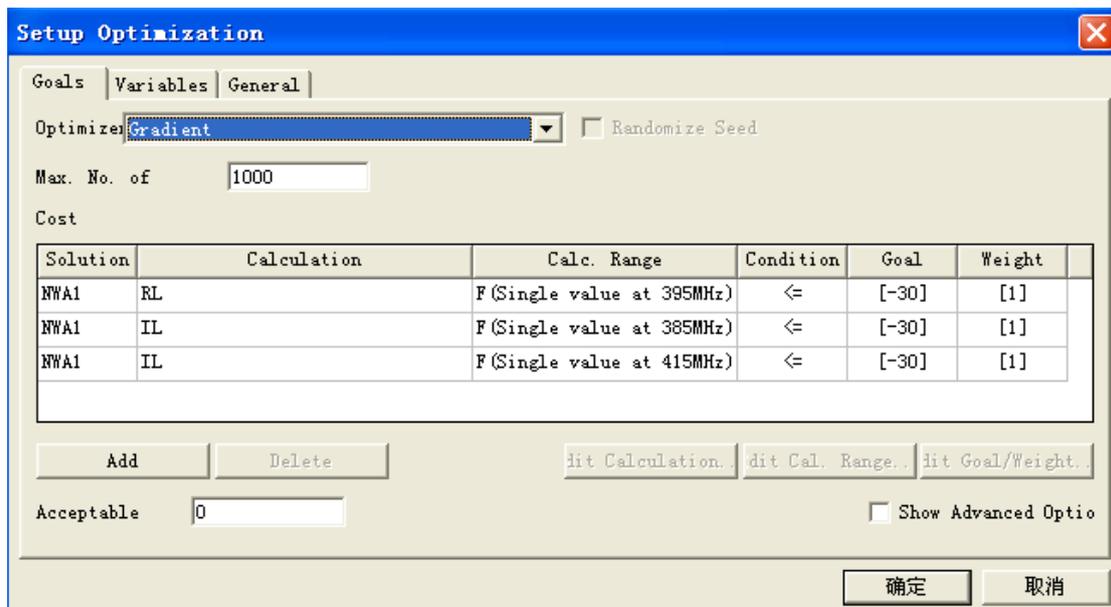


4) 在 Ansoft Designer 中完成滤波器的优化设计

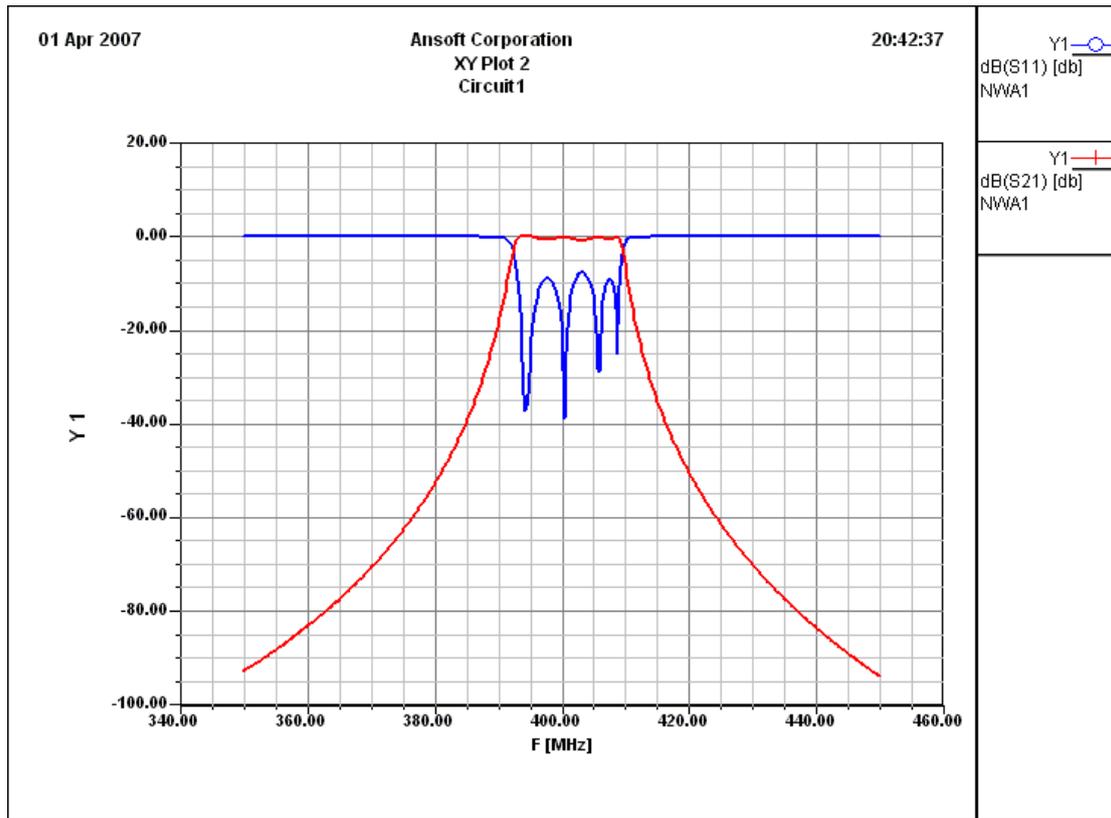
首先从菜单栏的 Circuit -> Design Properties -> Local variables -> Optimization 中选中需要参与优化的变量: res1-height, res2-height, pole-length, S1, S2。



优化设置与例一类似：

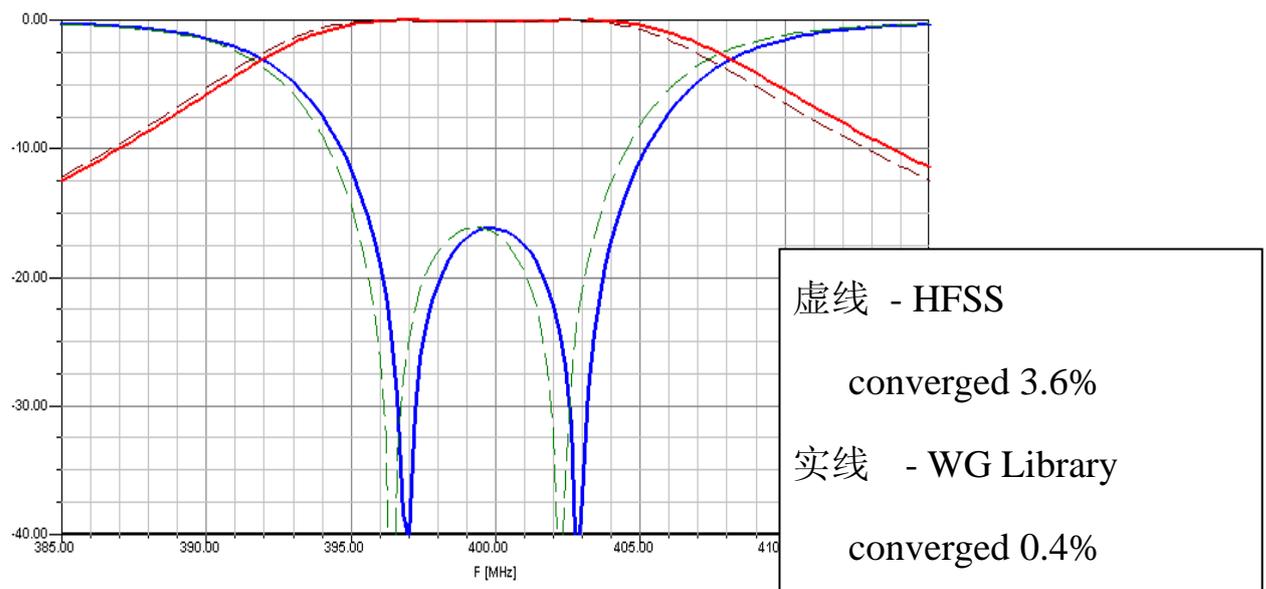


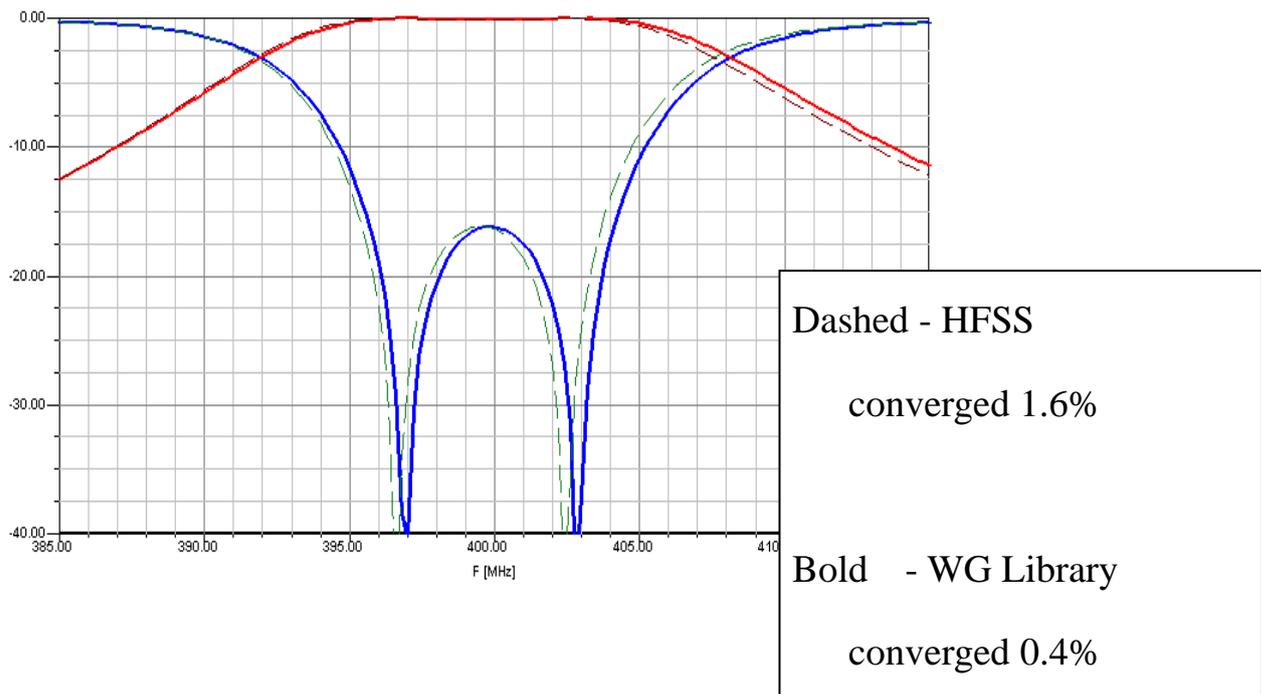
经初步优化后的滤波器频响特性如下图所示，优化是比较细致的工作，一般要通过几次优化微调才能达到较好的指标。



5) Ansoft Designer 与 HFSS 的仿真结果对比与讨论

对于这个例子中的滤波器，相对带宽只有不到 4%，因此对于仿真精度的要求很高。关于仿真精度的讨论是初次使用协同仿真的设计者十分关注的话题。下面我们对比了在不同的求解精度下（也就是收敛度“convergence”）整个滤波器结构在 HFSS 中进行仿真的结果与根据协同仿真在 ADE 中的仿真结果。





当整个滤波器结构在 HFSS 中进行仿真，收敛度达到 3.6% 时，消耗的峰值内存将超过 2GB；而协同设计中的单个基本单元在 HFSS 中仿真时，收敛度达到 0.4%，消耗的内存峰值仅为 300MB 左右。如果我们将频带缩小到 385MHz~415MHz，我们会仔细地观察到上述两种情况下的仿真频响曲线还是会有不到 500kHz 的频偏。而我们好奇的是，哪个仿真结果会更准确？

于是，我们继续加密网格，进一步的提高 HFSS 的收敛度（也就是求解精度）。当 HFSS 的收敛度达到 1.6% 时，消耗的峰值内存为 3GB，用这时的仿真结果和刚才的协同仿真结果进行对比，我们不难发现，虚线的 HFSS 频响曲线正在向实线所表示的协同仿真的频响曲线靠拢，这次的差距只有不到 300kHz。根据我们对仿真工具的理解，我们可以认为协同设计的仿真结果将更逼近于真实结果。

正如我们再一次证实了的：收敛度是网格剖分算法的基础，如果我们将复杂的结构离散成若干基本单元，基本单元的仿真收敛度越好，协同仿真的结果就会越精确，对于相对带宽较小的带通滤波器来说尤其是这样。

从上述两个带通滤波器的例子我们可以看到，Ansoft 协同设计方法不但将滤波器的设计周期从数周缩短到数日，并且降低了对计算机内存的需求，并且相比起滤波器整体在 HFSS 中仿真来说设计者更容易获得较高的精度。

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>