

ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

HFSS 经验分享：

从边值问题看吸收边界

侯伶俐 / 高级工程师

中国电子科技集团公司第二十九研究所

边界条件

边界条件用来表征平面、物体表面、物体间交界面的特性。作为求解麦克斯韦方程组的基础，边界条件是非常重要的。

为什么边界条件这么重要？

- ✓ HFSS求解的波动方程来源于麦克斯韦方程组的微分形式。其表达式有效的条件是场矢量是单值、有界、连续、可求导。由于在边界或激励源处，场是不连续的，其导数无意义。因此，就需要边界条件来定义边界不连续处的场的变化特性。
 - ✓ HFSS用户应该了解边界条件的含义，这样才能判断所用边界条件是否复合实际工况。乱用边界条件会得到同真实情况不一致的结果。
 - ✓ 正确的使用边界条件可降低模型的复杂度。事实上，HFSS也会自动的使用边界条件去简化复杂模型。当一个三维物体被设置为导体材料时，HFSS 会给导体表面设置有限边界条件，导体的内部不求解场。
 - ✓ 模型的复杂程度直接决定求解所需的时间和计算机内存。因此可以尽可能多的使用边界条件来降低模型复杂度。

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}$$

常用的边界条件

➤ 激励

波端口 (外部)

集总端口 (内部)

表面近似

对称边界

理想电壁和理想磁壁

辐射边界 (ABC/PML/BEBI)

背景或外部表面

有限电导率边界

阻抗边界 (分层阻抗 , 集总RLC)

主从边界

材料属性

两种介质材料交界面的边界

导体的有限电导率边界

这里要讨论的是： 有限元方法的辐射边界

ABC

PML

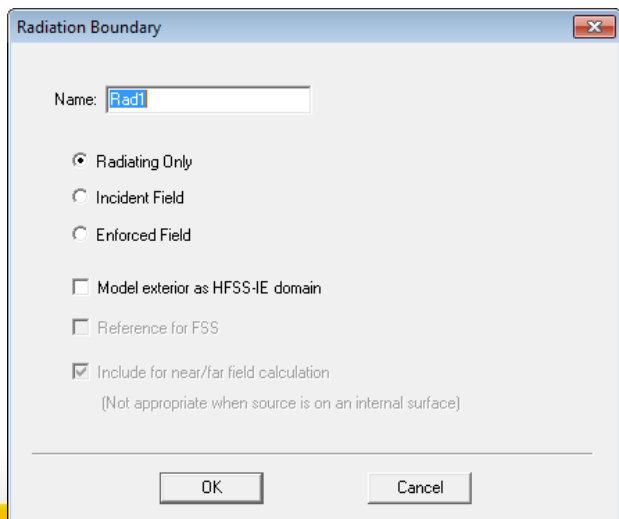
FEBI

回顾:通常谈到的辐射边界设置方法

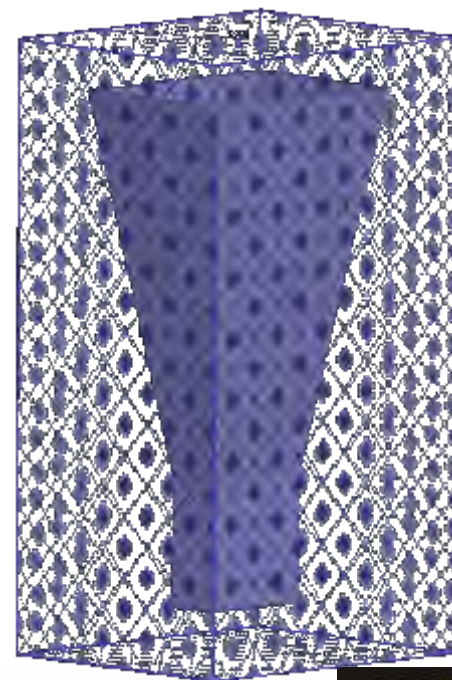
• 模拟界面外的波连续传播

- 通过二阶辐射边界吸收实现；
- 当入射波垂直于界面时吸收效果最好；
- 与辐射体的距离。
 - 距离强辐射结构的至少 $\lambda/4$ 。
 - 距离弱辐射结构的至少 $\lambda/10$ 。
- 在求解空间中对与所有入射场是凹形的。

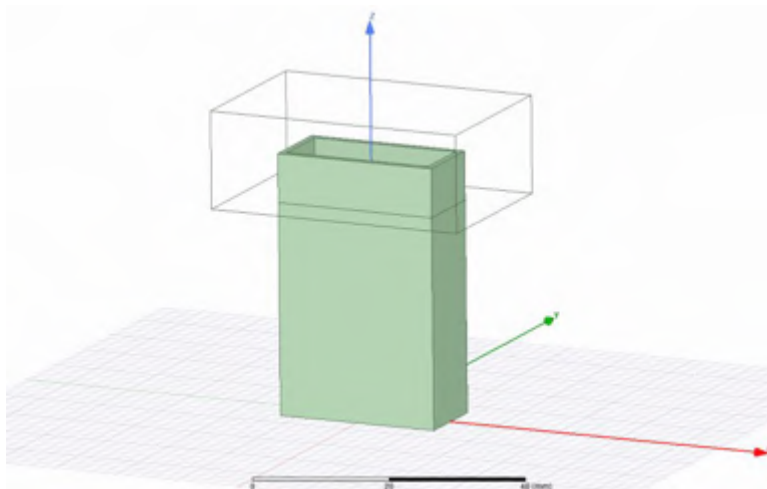
$$(\nabla \times \mathbf{E})_{tan} = jk_0 \mathbf{E}_{tan} - \frac{j}{k_0} \nabla_{tan} \times (\nabla_{tan} \times \mathbf{E}_{tan}) + \frac{j}{k_0} \nabla_{tan} (\nabla_{tan} \cdot \mathbf{E}_{tan})$$



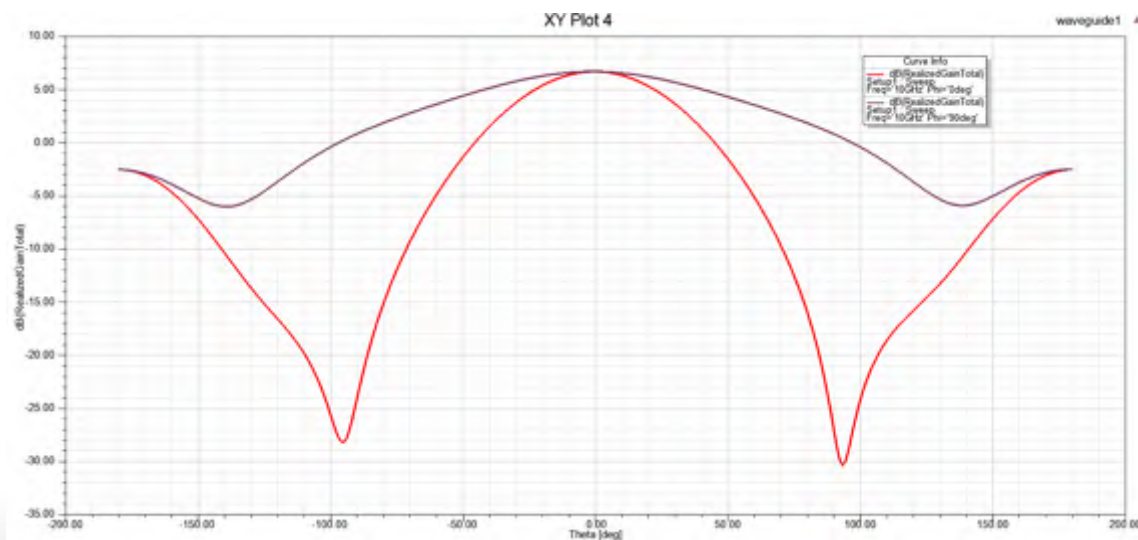
辐射边界在各个方向
上距离喇叭口面 $\lambda/4$



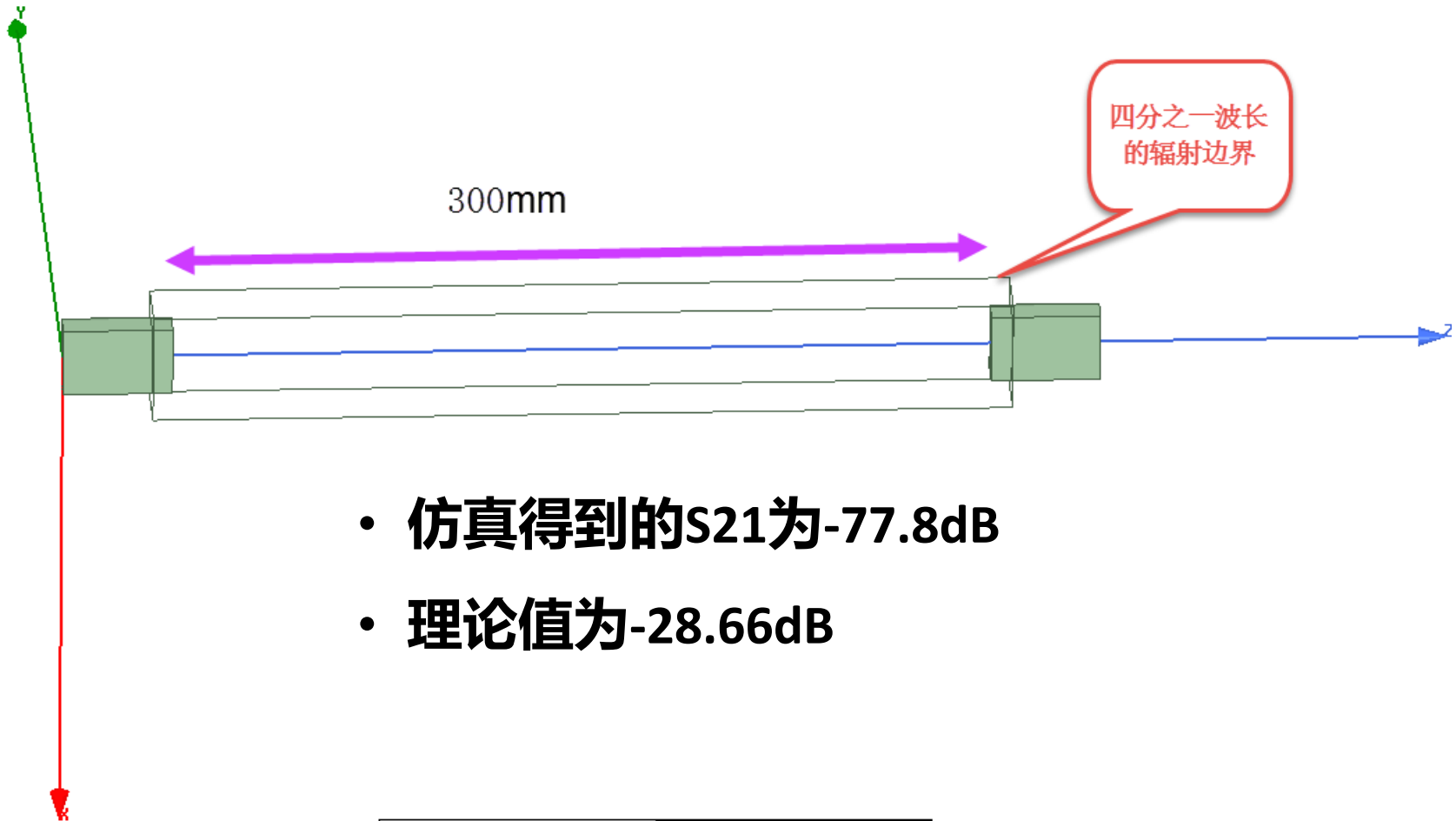
测试案例：开放场的近似截断



- 30mm标准波导
- 距离辐射口面 $\frac{\lambda}{4}$ 的辐射边界

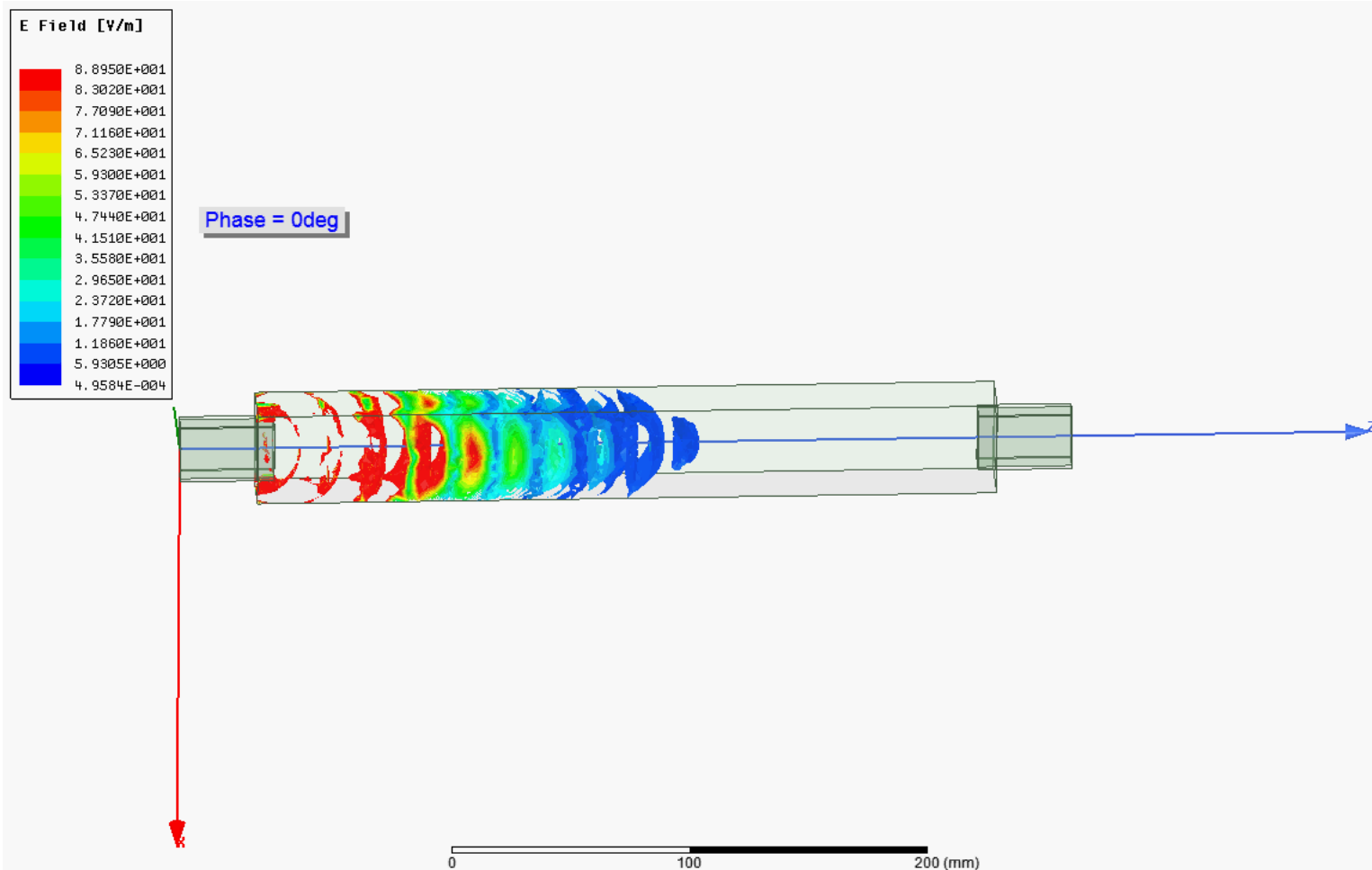


问题：计算空间电波传播



- 仿真得到的S21为-77.8dB
- 理论值为-28.66dB

问题：能量在空间消失啦？



吸收边界条件的内涵

- 以一阶ABC为例

$$\hat{n} \times \nabla \times \mathbf{H} + jk_0 \hat{n} \times \hat{n} \times \mathbf{H} = 0$$

- TE波在此边界条件下的物理特性？

TE波的本征函数展开

- Hz用本征函数展开

$$H_z = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h_z(k_x, k_y) e^{jk_z z}$$

- 本征函数变量分离

$$h_z(k_x, k_y) = (A_1 \cos k_x x + B_1 \sin k_x x) (A_2 \cos k_y y + B_2 \sin k_y y)$$

- 方程

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2$$

边界条件

$$\hat{n} \times \left(\frac{\partial h_z}{\partial y} \hat{x} - \frac{\partial h_z}{\partial x} \hat{y} \right) + jk_0 \hat{n} \times \hat{n} \times h_z \hat{z} = 0$$

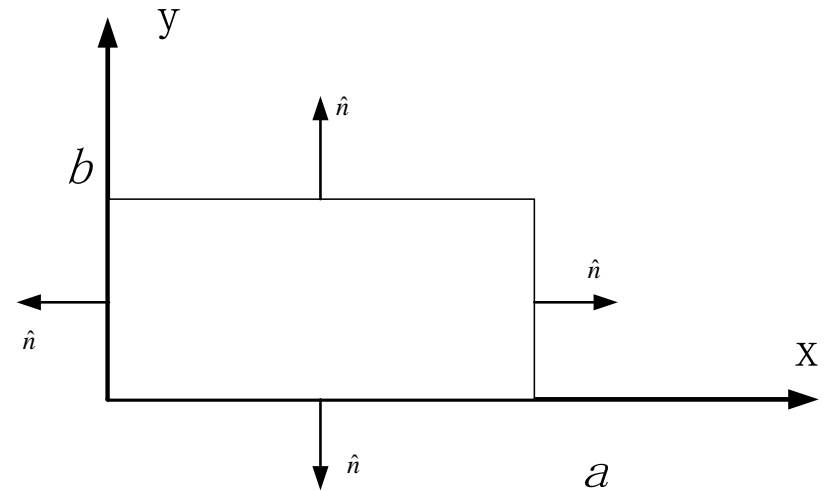
- 分别带入4个边界

$$\frac{\partial h_z}{\partial x} + jk_0 h_z = 0, \quad x = a$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial x} - jk_0 h_z = 0, \quad x = 0$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial y} + jk_0 h_z = 0, \quad y = b$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial y} - jk_0 h_z = 0, \quad y = 0$$

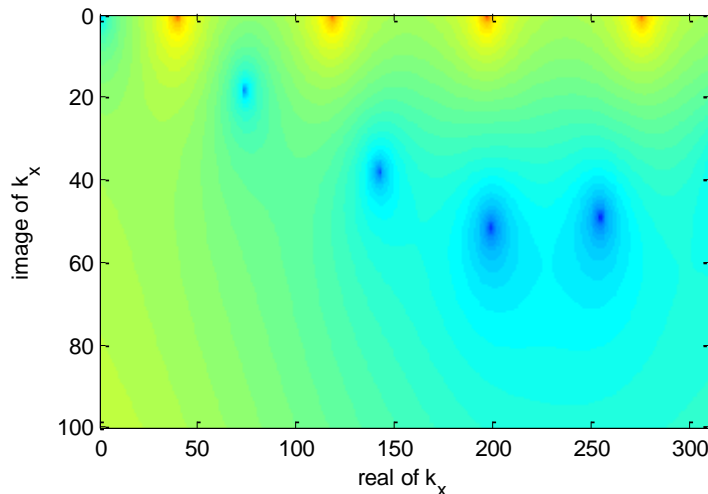


关于 k_x 的本征值方程

- 将本征函数带入，得到本征值方程

$$\tan k_x a = \frac{2jk_0 k_x}{k_x^2 + k_0^2}$$

- 求解，得



$f = 10\text{GHz}$

$a = 40\text{mm} \left(\frac{\lambda}{4} \text{ABC} \right)$

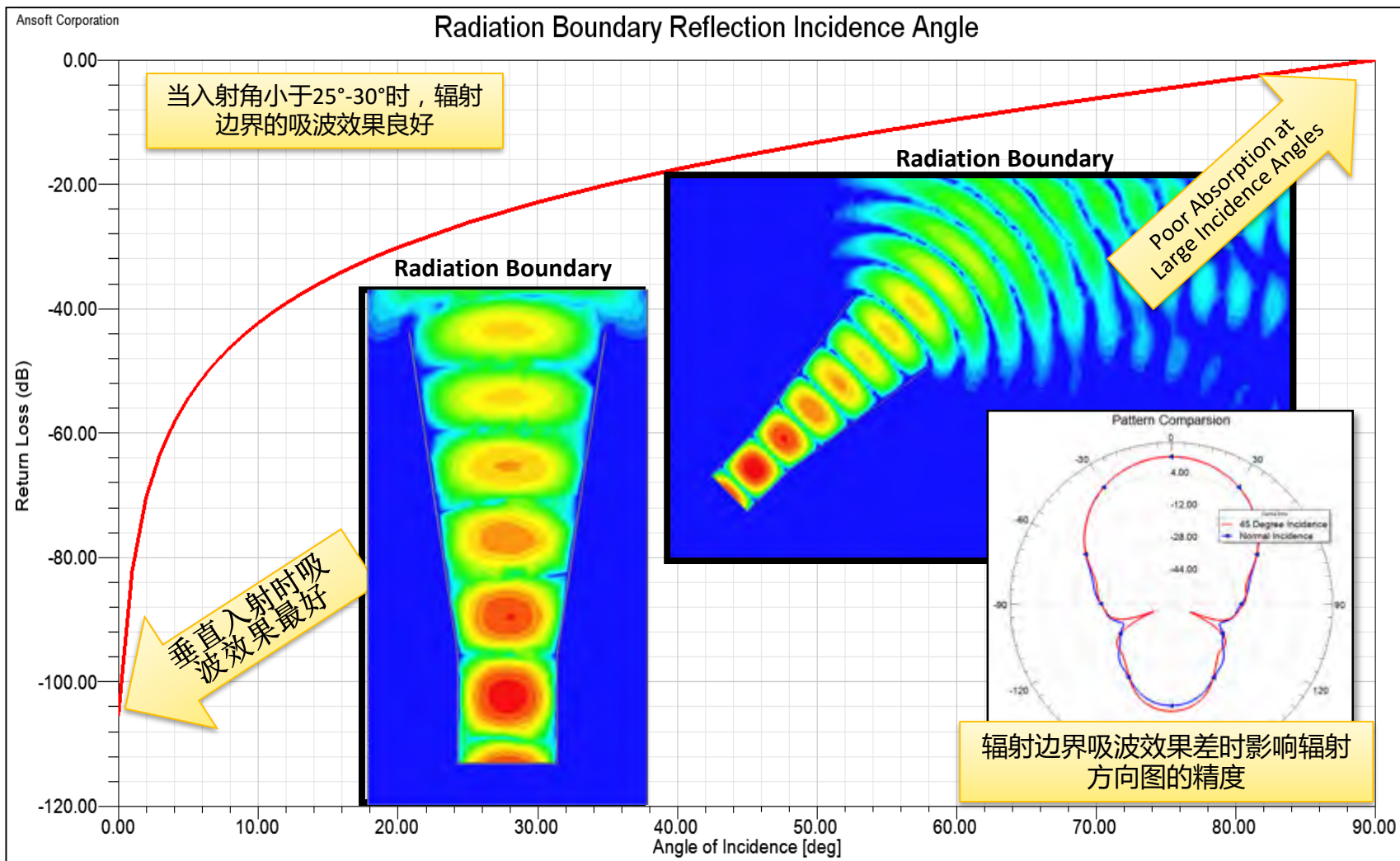
带入

$k_x = 73.6 + 18.2i$

$k_z = 197 - 6.8i$

- 为一衰减波，且大于自由空间衰减。

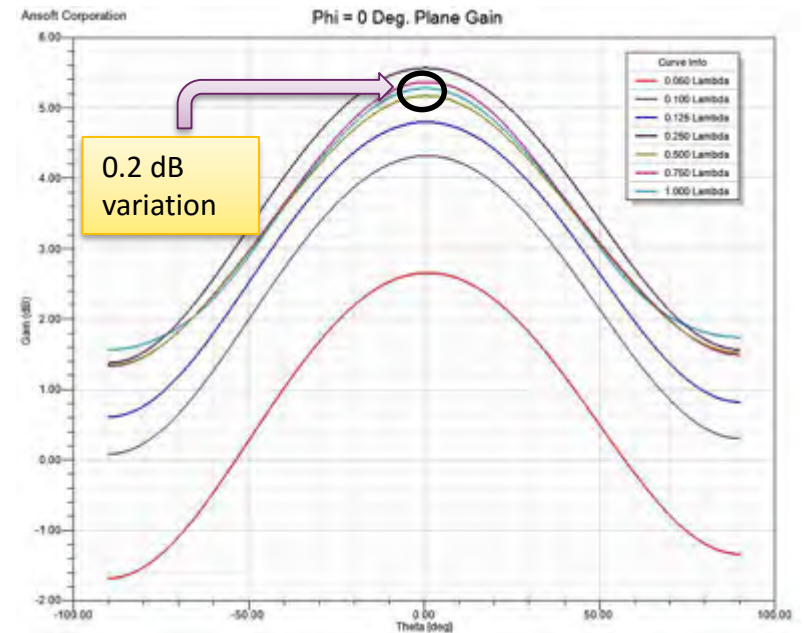
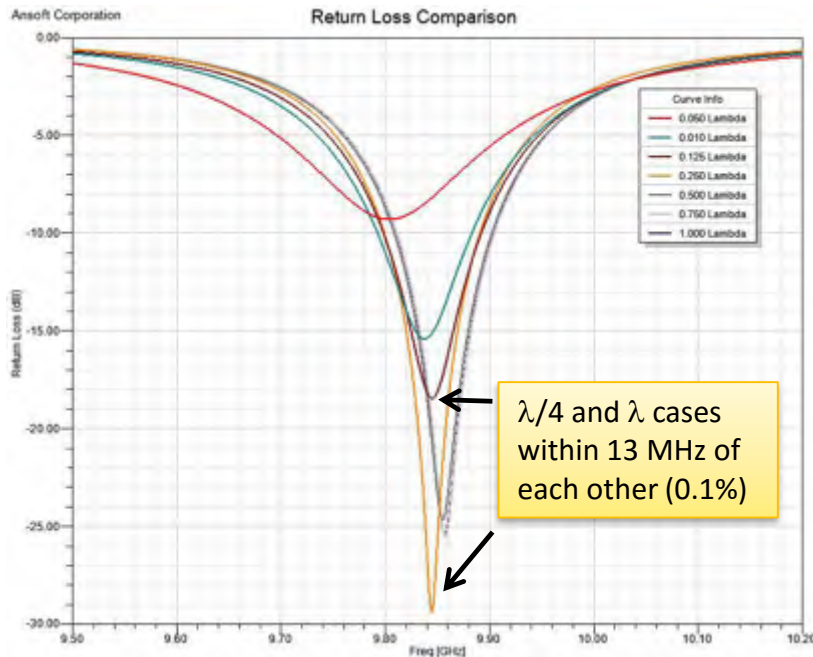
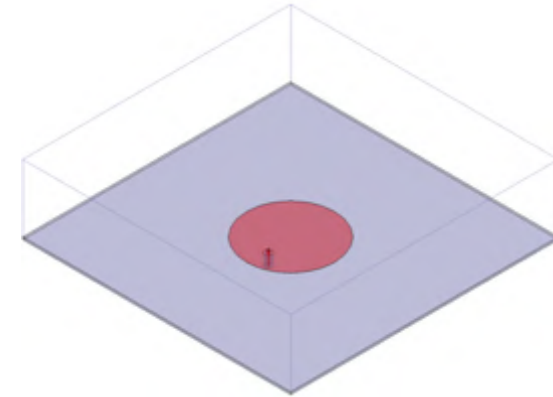
ABC边界: 随入射角的变化



ABC与辐射口的距离的影响

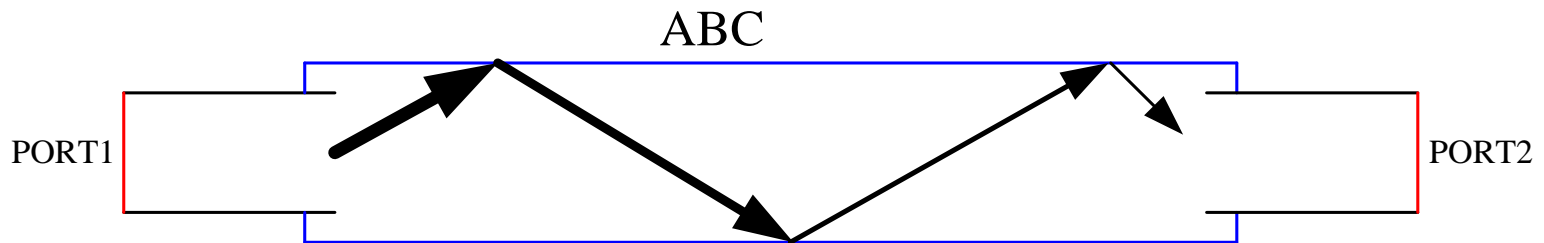
以探针馈电的圆形贴片天线为例

- 吸收边界 (ABC) 与天线的距离
 - ✓ $\lambda/20, \lambda/10, \lambda/8, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$
- 考察其对回波损耗和增益的影响



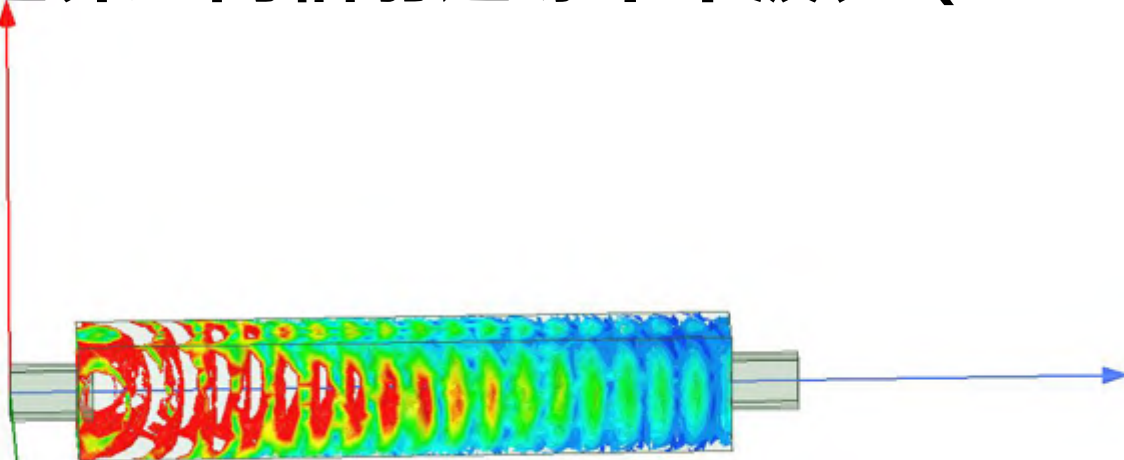
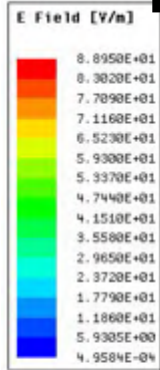
分析

- 当边界为 $\lambda/4$ 时，电磁波大角度入射到ABC，部分能量被吸收，部分被反射，反射部分二次入射到另一面ABC，再次被吸收和反射，由于距离300mm较长，电磁波在空气BOX里面多次反射，并多次吸收，所以表现出衰落的现象。



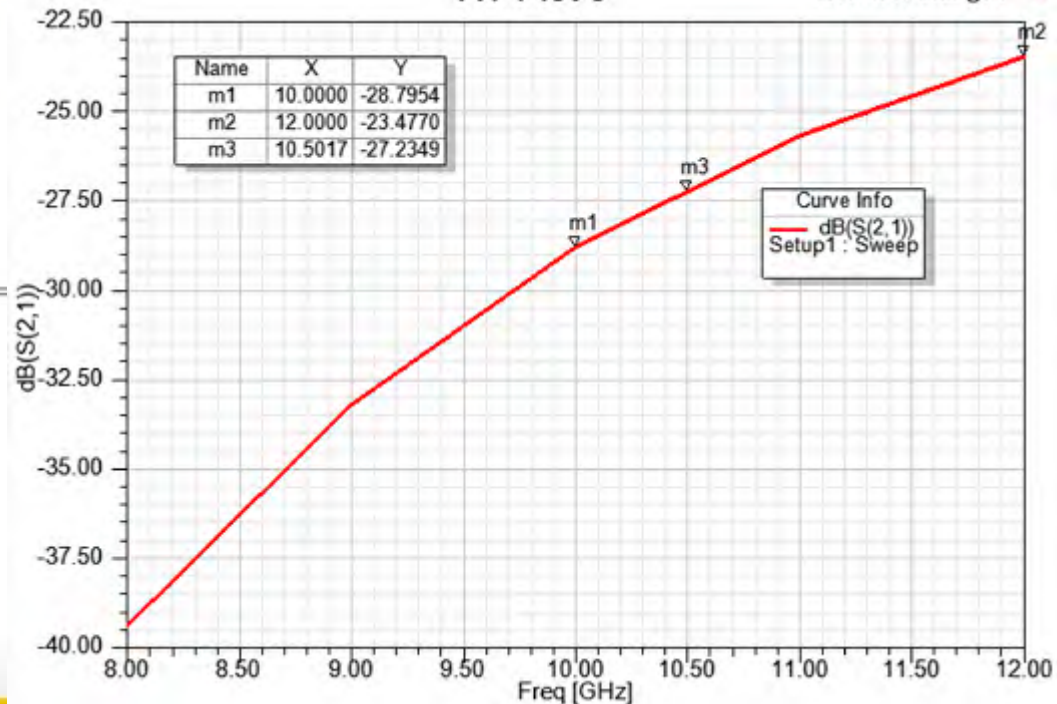
- 那是不是边界足够大就可以呢？

吸收边界距离辐射边缘半个波长 (15mm)

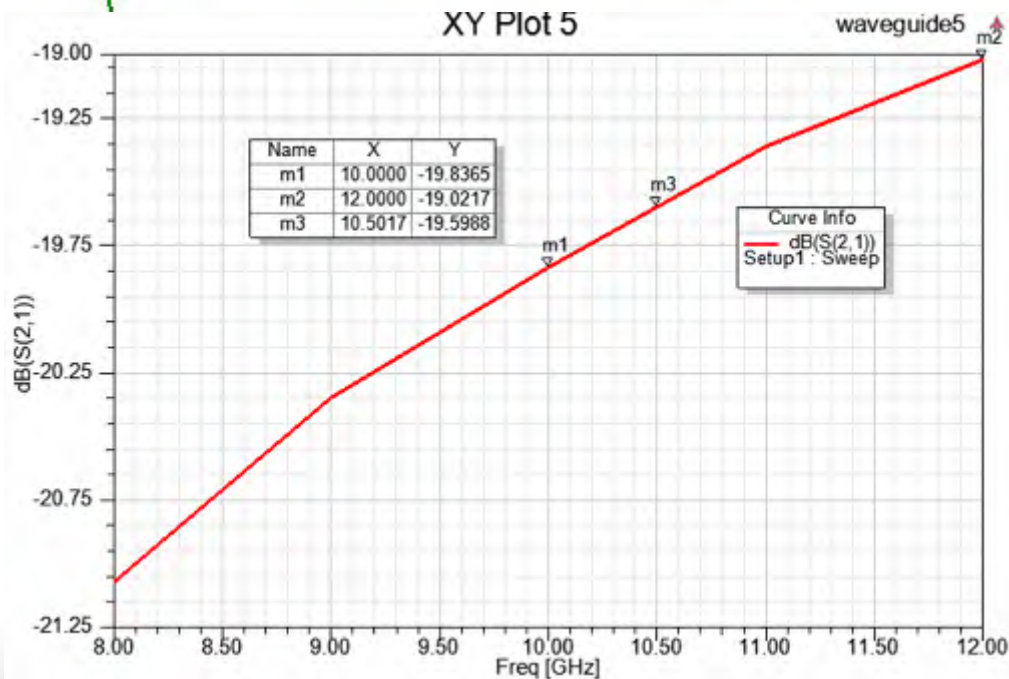
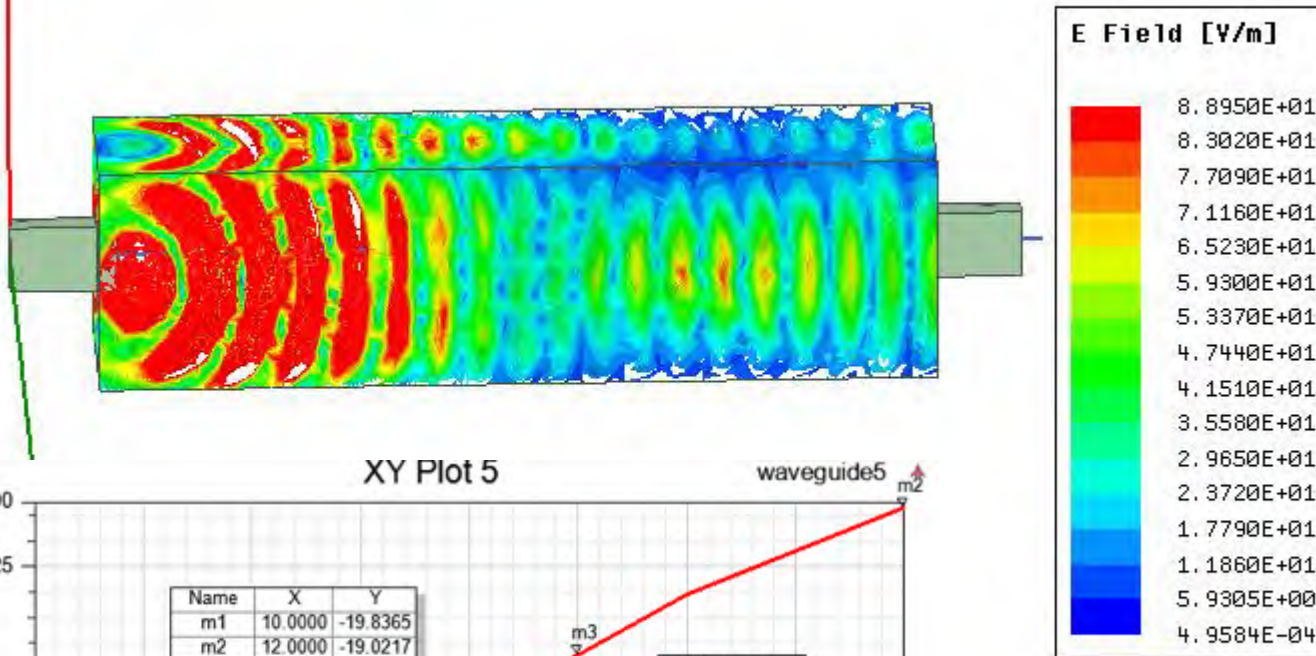


XY Plot 5

half wavelength ▲

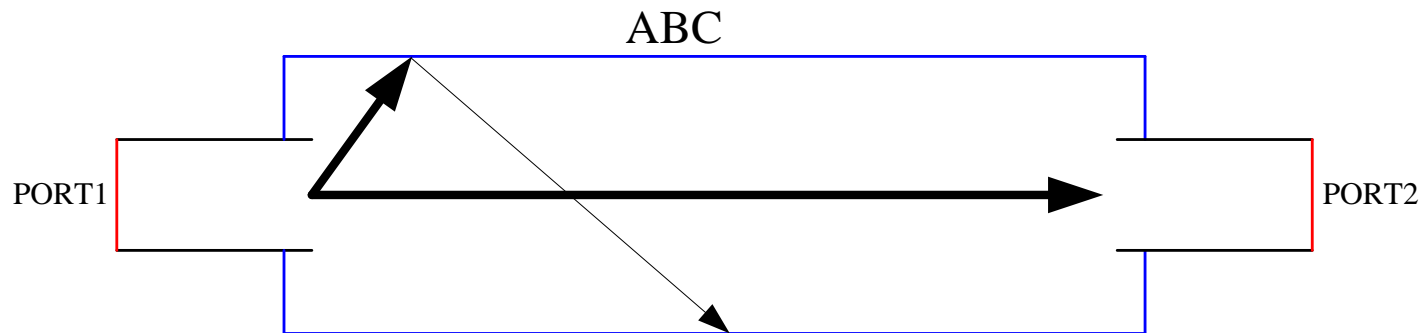


吸收边界距离辐射边缘一个波长 (30mm)



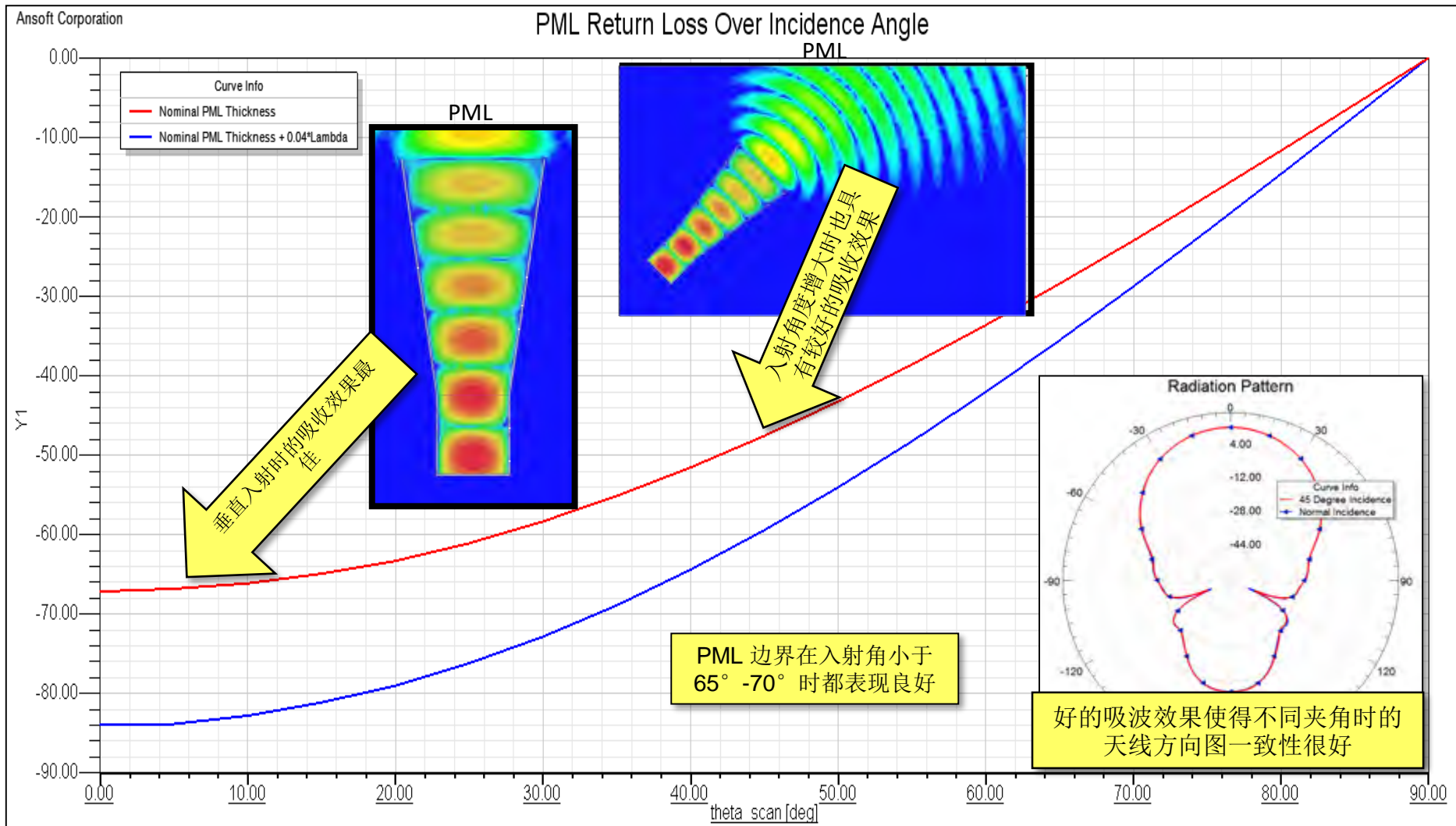
分析

- 当边界为 λ 时，部分电磁波小角度入射到ABC，能量被吸收，部分被传播到PORT2。但PORT2接收到的能量大于理论值，这是为什么呢？
空气BOX波导传输，无空间扩散损耗？



- 当边界为 $\lambda/2$ 时， S_{21} 与理论值符合，是巧合还是必然？

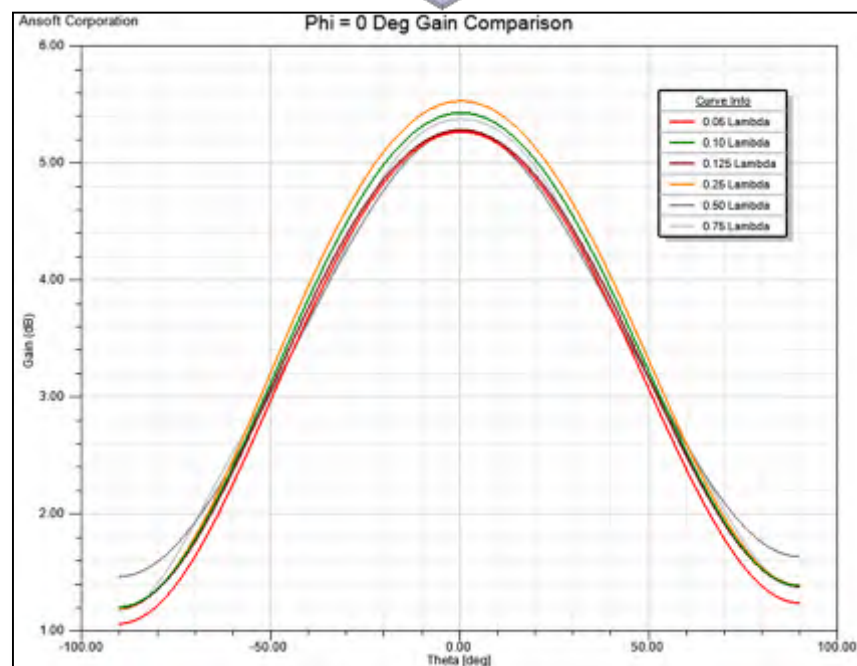
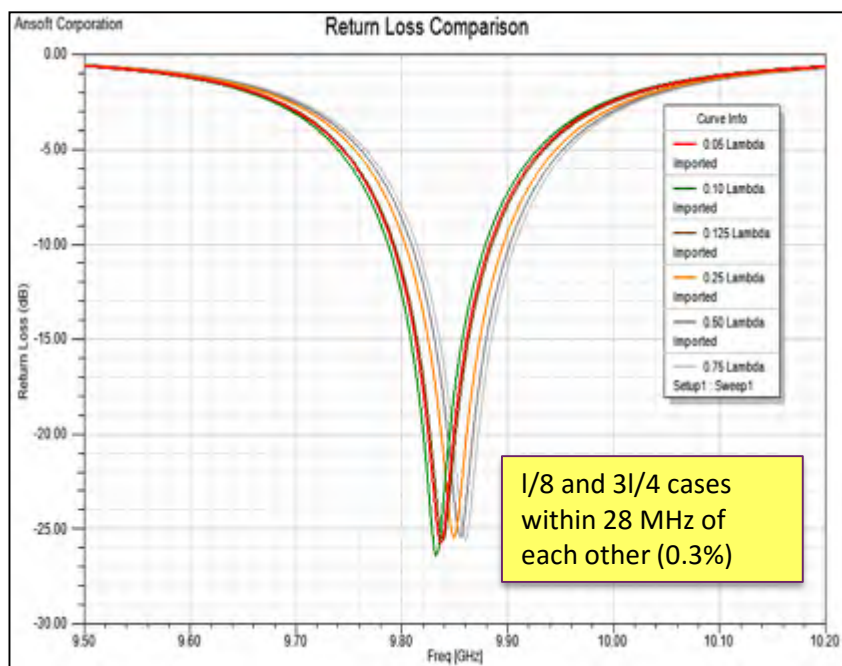
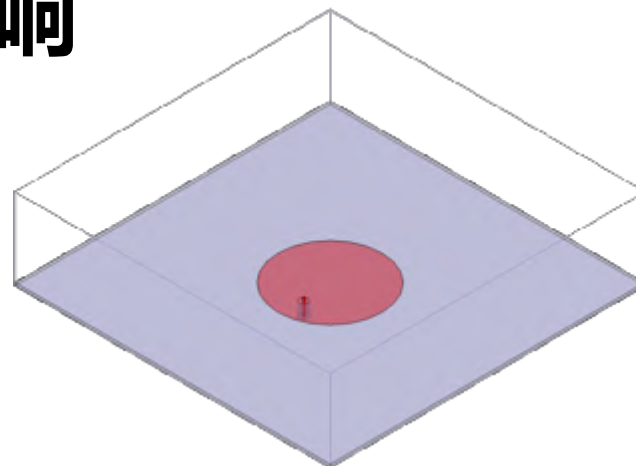
PML: 随入射角的变化



PML同辐射体的距离的影响

以探针馈电的圆形贴片天线为例

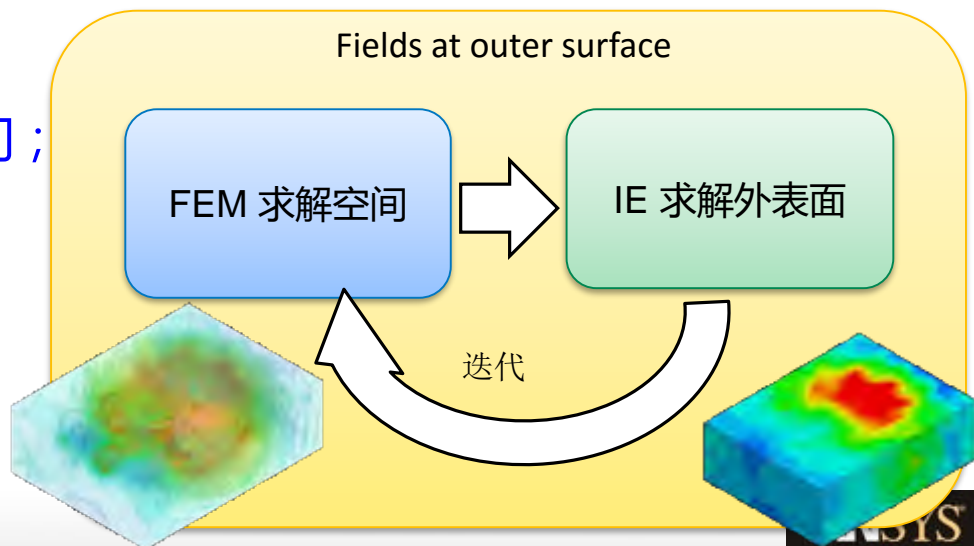
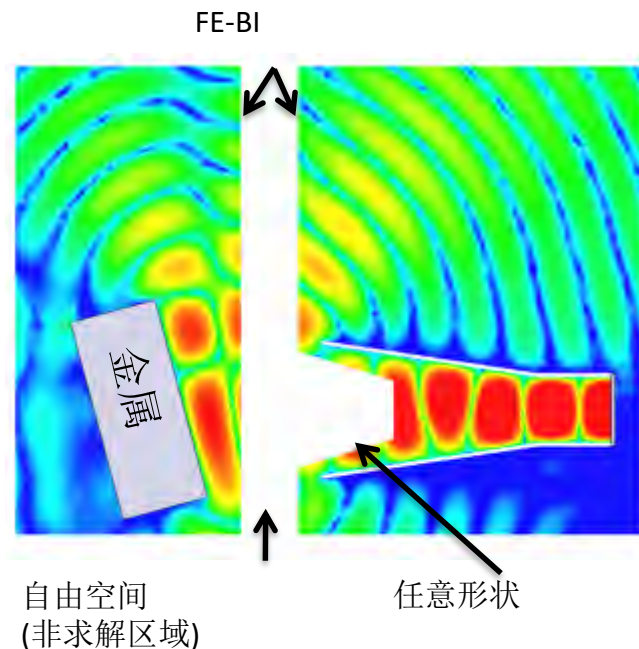
- 天线和PML的距离
 - ✓ $\lambda/20, \lambda/10, \lambda/8, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$
- 考察回波损耗和增益的影响。



Finite Element – Boundary Integral (有限单元 - 边界积分)

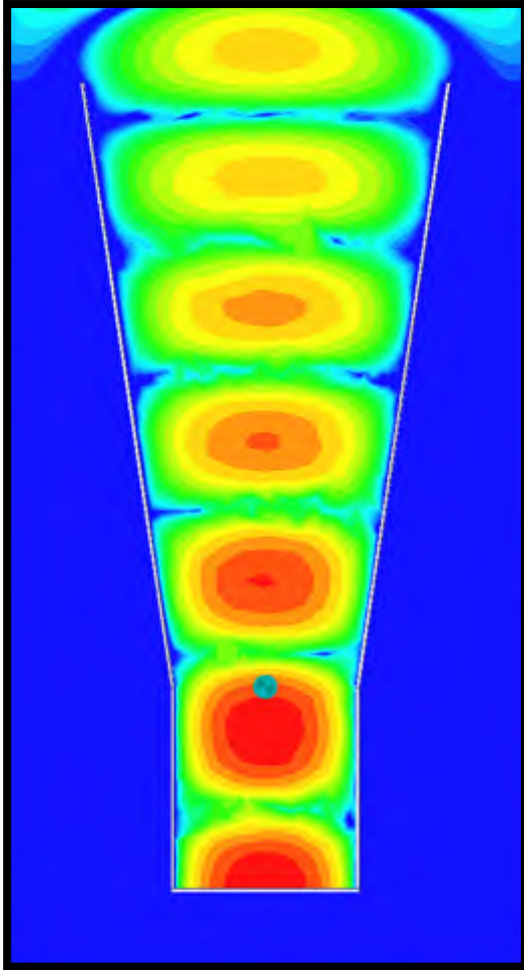
• FE-BI

- 将无限大自由空间的网格截断成有限可计算域；
- 可替换辐射或PML边界
- FEM和IE的混合算法
 - ✓ IE求解外表面
 - ✓ FEM求解内部空间
- FE-BI优点
 - ✓ 支持任意形状边界
 - 支持不连续和最小化的求解空间；
 - ✓ 无反射的边界条件
 - 对于辐射、散射问题精确度高。
 - ✓ 距辐射源无理论最小距离
 - 减小求解空间和简化问题设置。

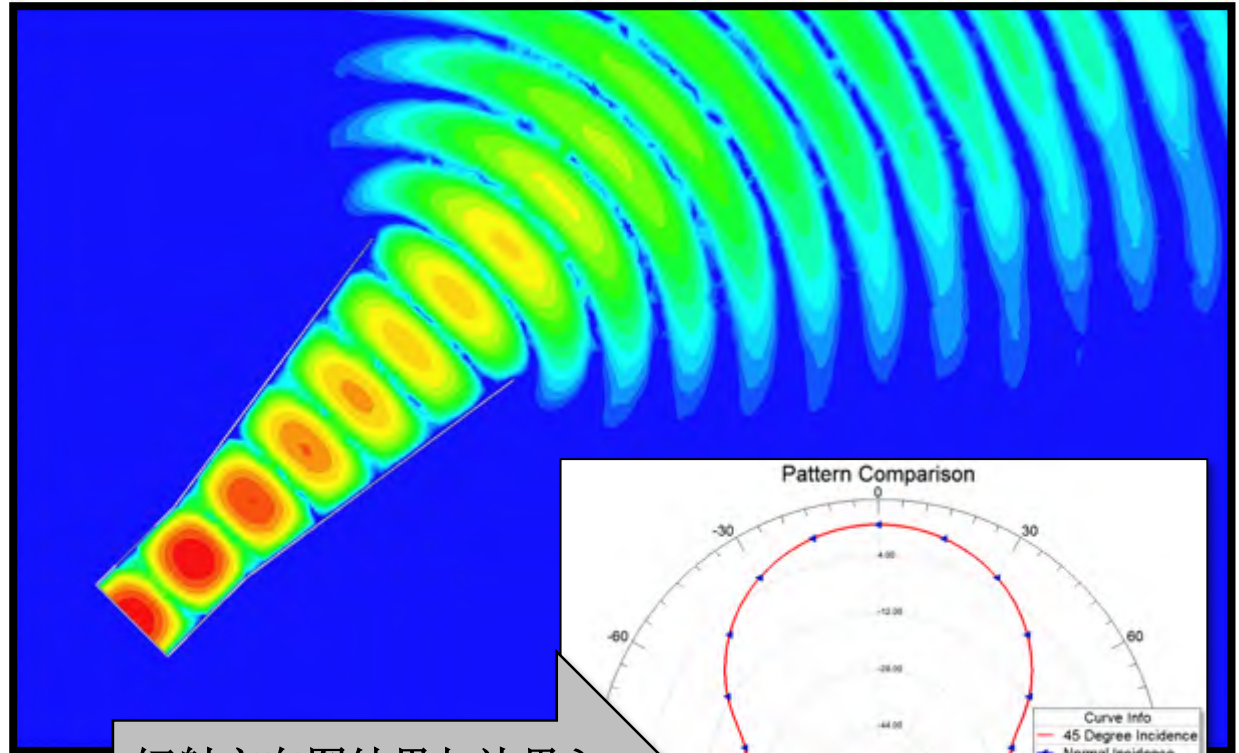


FEBI与入射角度的相关性

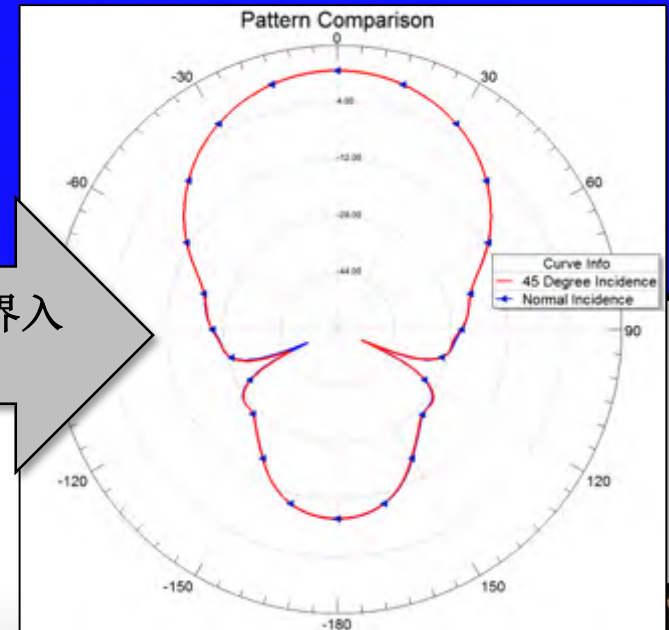
FEBI 边界



FEBI 边界



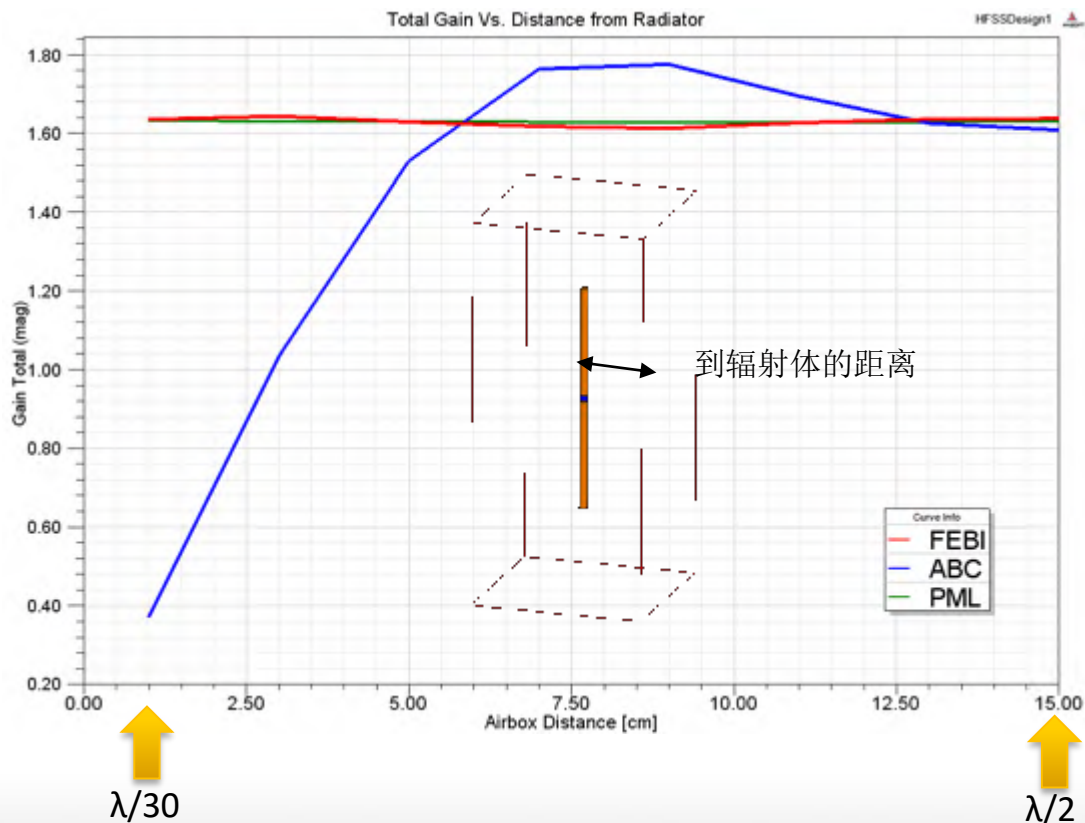
辐射方向图结果与边界入射波角度基本无关



FEBI与辐射体的距离的影响

• 峰值增益 vs. 空气盒子的尺寸

- 普通辐射边界需要距天线至少 $\lambda/4$ ，以便于精确计算远场。
- PML 和 FE-BI 可精确计算增益，它们与辐射体的距离甚至可以小到 $\lambda/30$ 。



采用FE-BI边界

频率 (GHz)	S21	
	理论值	仿真值
8	-29.19	-29.08
9	-28.92	-29.66
10	-28.64	-30.19
11	-28.46	-29.29
12	-28.42	-29.27



心得与疑问

1. **ABC边界，吸收效果与距离和入射角度有关，距离为 $\lambda/4$ ，垂直入射时，吸收效果最好。**
2. **不同的边界条件因算法不同而有不同的特点，熟知方可准确使用。推而广之，HFSS很强大，充分了解并掌握其特点，在设计工作中才能发挥其最大效益。**
3. **上述算例，ABC边界为 $\lambda/2$ 时，S21与理论值符合，是巧合还是必然？**

ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

感谢聆听



ANSYS-China