

矩形波导馈电的角锥喇叭天线 CST 仿真

一、实验目的

1. 掌握矩形波导馈电角锥喇叭天线的 CST 建模与仿真方法。
2. 分析喇叭天线的 S 参数、驻波比、方向图及电场分布特性。
3. 比较理论增益与仿真增益，验证仿真结果的准确性。

二、矩形波导馈电角锥喇叭天线理论分析

(1) 天线结构

矩形波导馈电的角锥喇叭天线，是由矩形波导在宽边和窄边同时按一定角度张开而形成的。矩形波导尺寸为 $a \times b$ ，喇叭口径尺寸为 $D_H \times D_E$ ，喇叭高度为 L 。H 面内虚顶点到口径中点的距离为 R_1 ，E 面内虚顶点到口径中心的距离为 R_2 。

(2) 设计参数

实验天线工作在 X 波段 (8.2–12.4GHz)，中心频率为 10.3GHz，对应波长 $\lambda = 29.1 \text{ mm}$ 。
选择 X 波段标准矩形波导作为馈电波导，其尺寸： $a = 22.86 \text{ mm}$ ， $b = 10.16 \text{ mm}$
角锥喇叭的几何参数为： $D_H = 141 \text{ mm}$ ， $D_E = 105 \text{ mm}$ ， $L = 200 \text{ mm}$
仿真建模时采用的实际参数为 $D_H = 138.46 \text{ mm}$ ， $D_E = 104.46 \text{ mm}$ ，已考虑壁厚影响。

(3) 理论增益计算

对于矩形波导馈电的角锥喇叭天线，其增益可由以下经验公式估算：

①计算虚顶点距离： $R_1 = \frac{L \times D_H}{D_H - a} \approx 238.7 \text{ mm}$ ， $R_2 = \frac{L \times D_E}{D_E - b} \approx 221.4 \text{ mm}$

②计算斜距： $L_H = \sqrt{R_1^2 + \frac{D_H^2}{4}} \approx 248.9 \text{ mm}$ ， $L_E = \sqrt{R_2^2 + \frac{D_E^2}{4}} \approx 227.5 \text{ mm}$

③计算口径面积和相位偏差参数：

口径面积： $A^2 = D_H \times D_E = 14805 \text{ mm}^2$

相位偏差参数： $S_H = \frac{A^2}{8\lambda L_H} \approx 0.255$ ， $S_E = \frac{A^2}{8\lambda L_E} \approx 0.279$

④计算增益修正因子： $\alpha = 8S_H \approx 2.04$ ， $\beta = 8S_E \approx 2.23$

查表 1，由线性插值可得： $\Delta G_H \approx 0.49 \text{ dB}$ ， $\Delta G_E \approx 1.26 \text{ dB}$

⑤代入增益公式： $G = 10.8 + 10 \lg \left(\frac{D_H \times D_E}{\lambda^2} \right) - \Delta G_H - \Delta G_E \approx 21.5 \text{ dBi}$

经计算，该矩形波导馈电角锥喇叭天线在中心频率 10.3 GHz 处理论增益为 21.5 dBi，该值将作为后续仿真结果对比的参考基准。

三、建模步骤记录

(1) CST 初始设置

打开 CST 软件，选择 New Project->MICROWAVES&RF->Antennas->Waveguide (Horn,Cone,etc.)->Time Domain，并设置单位 Dimensions: mm，Frequency: GHz；

(2) 建立模型

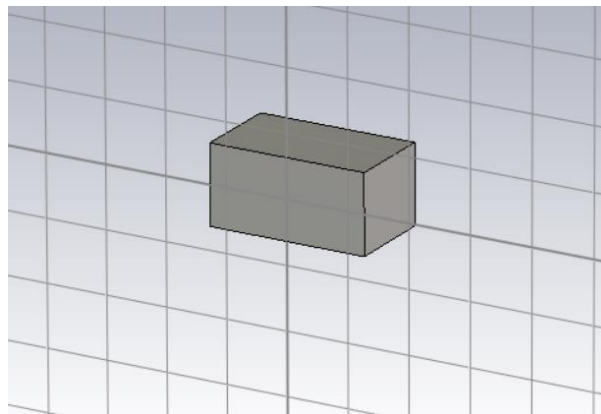
①参数设置

将矩形波导馈电角锥喇叭天线的尺寸参数设置如下：

Parameter	Value
DE	104.46
DH	138.46
F	10.3
L	200
Lambda	29.1
a1	22.86
b1	10.16
t	2.54

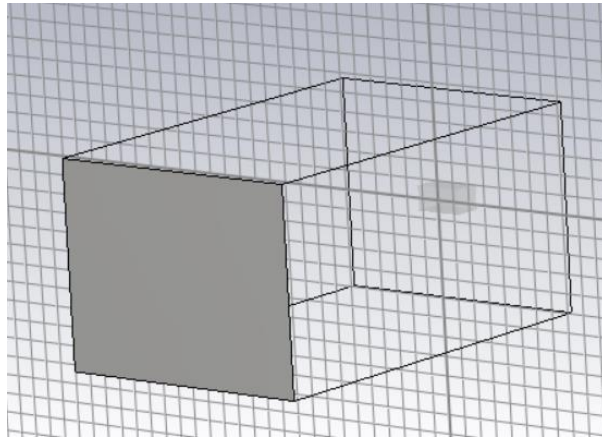
②创建矩形

点击 Modeling->Shape->Brick，直接按 Esc 键，弹出窗口，输入表中数据，Layer 选择 PEC，创建完成后如图所示：



③建立喇叭模型

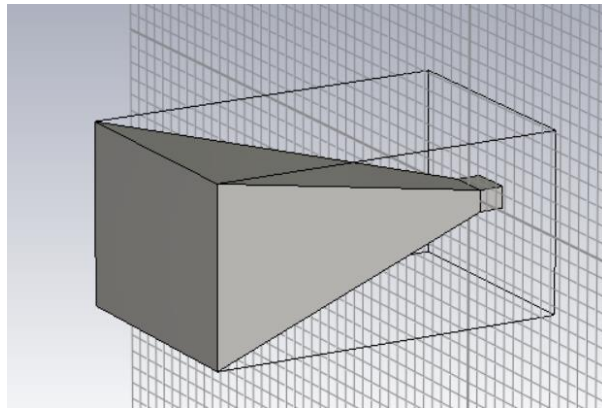
创建喇叭口径面：Modeling->Curves->Rectangle；Modeling->Curve Tools->Cover Planar Curve，选中口径面：Modeling->Picks->Pick Face，设置口径面的位置：Modeling->Transform->Translate，创建完成后如图所示：



④创建喇叭侧壁

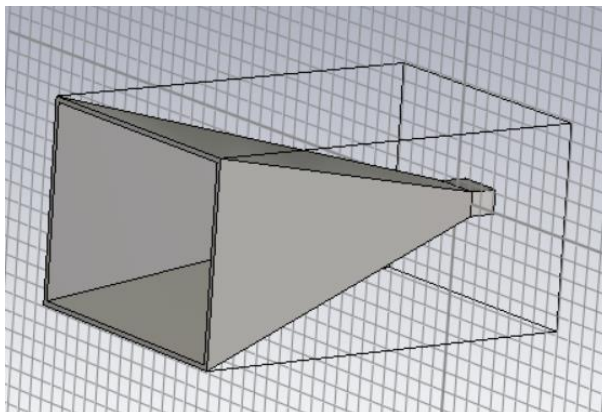
选中波导和喇叭的口径面，创建喇叭侧壁 Modeling->Shapes->Loft，进行全层相加：

用 Modeling->Boolean->Add 命令使整个 PEC 层变成一个物体，完成后如图所示：



⑤掏空

分别选取物体前后两个面，掏空生成喇叭：Modeling->Shape tools->Shell Solid or Thicken Sheet，至此完成整个天线的 CST 建模：



四、仿真步骤记录

(1) 仿真条件设置

仿真频率设置：Simulation->Frequency (仿真的频率范围：8.2GHz-12.4GHz)

仿真边界条件设置：Simulation->Background (设置为 Normal)

Simulation->Boundaries (设置为 open (add space))

端口设置：选取波导口面，设置波导端口，输入参数后确定模式吸收数 (Number of modes = 5)：Simulation->Waveguide Port;

设置监视器：Simulation->Field Monitor->Farfield(RCS) (中心频率：10.3GHz)

(2) 模式分析

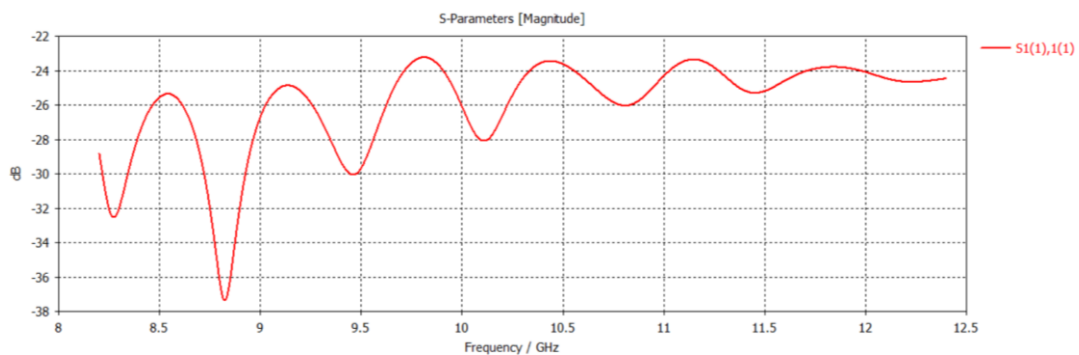
模式分析设置：Simulation->Start Simulation->Source type: All Ports Modes

选中 Calculate modes only，只计算端口模式不执行时域仿真，可预先了解模式分布。

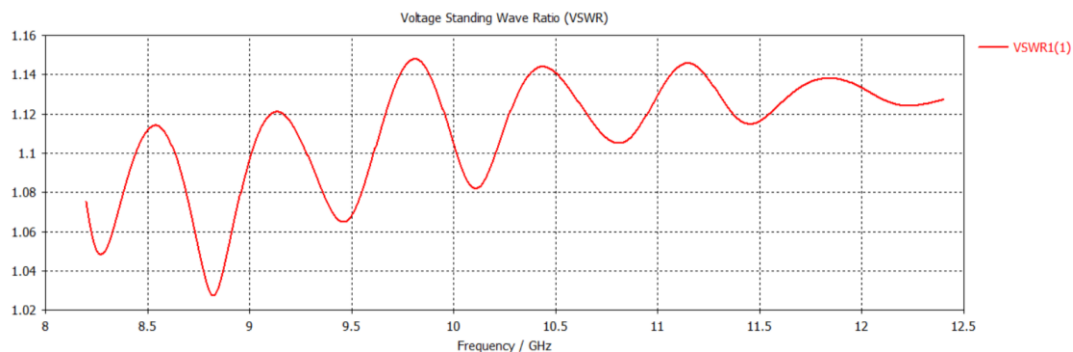
模式仿真分析：Simulation->Logfile->Solve Logfile，由于仿真最高频率为 12.4GHz，所以在这种结构的喇叭天线中只传输 1 种模式的波，设置的吸收模式数只需大于 1。

五、仿真结果分析

(1) 喇叭天线的 S11 与驻波比特性曲线：

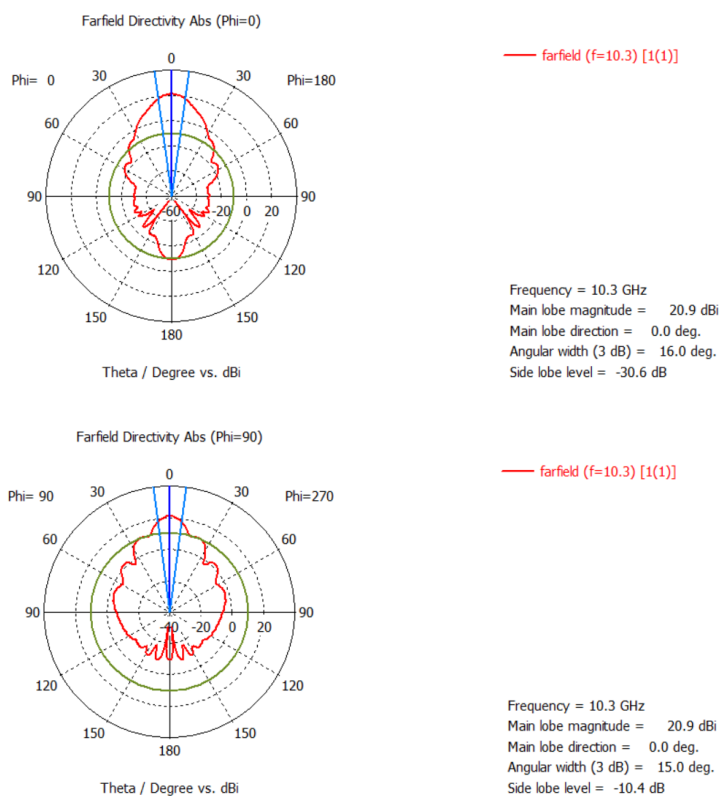


S11 曲线分析：上图为喇叭天线输入端口的 S11 反射系数曲线。由图中可见，在 8.2–12.4 GHz 整个 X 波段内，S11 曲线整体均在 -20 dB 以下，这表明天线与馈电波导之间匹配良好，绝大部分信号能量被天线辐射出去，反射回波导的能量极小。天线在所需频段内满足工程使用要求。



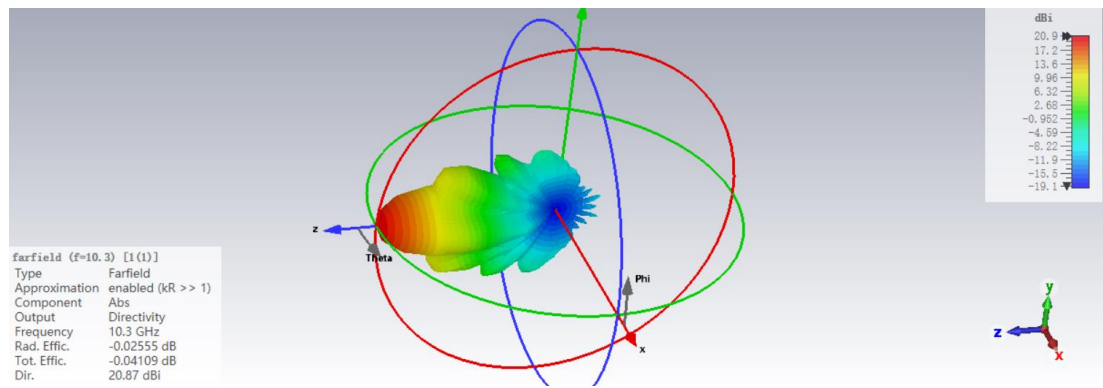
驻波比特性曲线分析：上图为喇叭天线输入端的电压驻波比 VSWR 曲线。由图可见，在 8.2–12.4 GHz 工作频段内，VSWR 曲线整体略高于 1.0，但在所需频段内均小于 1.2，最小可达到 1.03，低驻波比特性进一步证实了天线输入端口与馈电波导实现了良好的阻抗匹配，信号馈入效率高。

(2) 喇叭天线的水平、垂直方向图



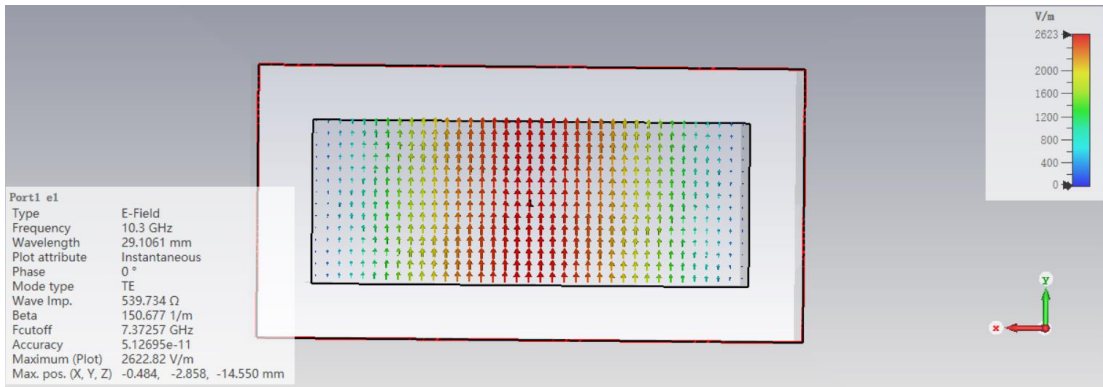
水平垂直方向图分析：上面两幅图分别给出了角锥喇叭天线在中心频率 10.3GHz 处的垂直面（E 面，Phi=0°）和水平面（H 面，Phi=90°）极坐标方向图。两方向图均显示，天线主瓣精确指向 0°方向（即天线轴向），主瓣增益均为 20.9dBi。这表明天线具有优异的正向辐射特性，能量集中向前方辐射。而垂直面上半功率波瓣宽度为 16.0°，波束较宽；水平面上半功率波瓣宽度为 15.0°，波束稍窄。但两者波束宽度非常接近，仅相差 1.0°，

说明该角锥喇叭天线在垂直面和水平面上的辐射覆盖角度基本对称，这与喇叭口径在两个维度上的展开尺寸相差不大是一致的。同时，垂直面副瓣电平为-30.6 dB，表明该平面内副瓣极低，能量高度集中于主瓣，水平面副瓣电平为-10.4 dB，明显高于垂直面，但仍满足一般工程要求。由此看来，该角锥喇叭天线在中心频率处方向图的对称性好，正向辐射增益较高，且垂直面内副瓣抑制性能非常优异，在水平面内的副瓣电平也在可接受范围。整体来看，天线具有良好的方向性。

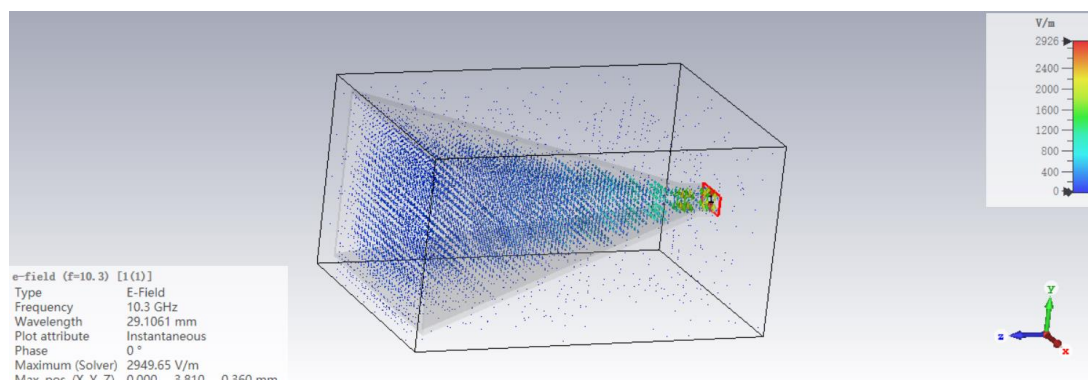


同时我们比较理论增益与仿真增益，经前面的计算可知该喇叭天线的理论增益为 21.5dBi，而仿真增益为 20.9dBi，两者误差较小，进而验证了仿真结果的准确性。

(3) 喇叭天线与波导口的电场情况



波导口的电场情况分析: 上图显示了波导口截面电场的分布情况。电场矢量沿垂直方向，在波导截面中心处场强最强 (最大为 2622.82 V/m)，向两侧逐渐减弱，边缘处降至很低。参数显示该模式为 TE 模，截止频率 7.37 GHz，远低于最低工作频率 8.2 GHz，保证整个 X 波段信号高效传输。



喇叭天线中的电场情况分析：上图显示了喇叭天线电场的分布情况，电场被有效约束在波导和喇叭金属壁内部，导体外壁基本无电场。电磁波从窄波导段进入逐渐张开的喇叭段后，电场随之扩散，红色高场强区从波导口的集中分布逐渐向喇叭口径面展开，最终向自由空间辐射。这一过程完整展示了电磁波从导行波到空间辐射波的演变，符合喇叭天线工作原理。

六、收获与体会

通过本次实验，我掌握了使用 CST Studio Suite 进行矩形波导馈电角锥喇叭天线建模与仿真的基本流程，包括参数化建模、边界条件与激励端口设置、场监视器配置以及仿真结果的查看与分析。

在操作过程中，我体会到几何模型建立的每一步都直接影响后续仿真结果的准确性，参数定义、布尔运算、掏空处理等环节需仔细确认。通过分析 S11 和驻波比曲线，我直观理解了天线匹配性能的评判标准。通过对比水平和垂直方向图，我认识到天线口径尺寸与波束宽度之间的对应关系。仿真增益与理论增益的对比，则让我理解了理论公式的适用条件与局限性。

此外，通过查看波导口和喇叭内部的电场分布，我对电磁波从导行波过渡到空间辐射波的过程有了更清晰的认识。本次实验将课堂所学的电磁场理论与实际工程仿真相结合，加深了我对喇叭天线工作原理和辐射特性的理解。