

# 第十一章 ADS基础与低噪放设计

## ◎ ADS简介

- 现有主流电磁仿真软件
- ADS的主要仿真器
- ADS操作基础

## ◎ 低噪放设计

- 理论回顾
- 给定指标及一般设计步骤
- 具体过程

# 11.1 ADS简介

## 1. 现有主流电磁仿真软件

主流的电磁仿真软件主要基于以下三种方法：

- 矩量法（MOM）：ADS、Ansoft Designer、Microwave Office、IE3D、FEKO；
- 有限元法（FEM）：Ansoft HFSS、ANSYS、EMDS；
- 时域有限差分法（FDTD）：EMPIRE、XFDTD、CST

作为**板级和IC级**电路设计师，ADS集成的Momentum其效率远超HFSS和CST；ADS能与目前主流的3D制图软件进行导入和导出；对于在第三维度上具有非均匀延展的结构如天线、键合线等，其中集成的三维求解器EMDS（基于有限元法）能提供完美解决方案；Agilent公司和各大元器件厂商广泛合作并提供最新的Design Kit给用户使用；ADS能与许多著名的EDA软件进行协同仿真，如CST、Matlab等。

ADS集合了多种EDA软件的优点，可进行时域仿真、频域仿真、模拟电路、数字电路、线性和非线性电路仿真，小到单独元器件的仿真，大到系统仿真、数/模混合仿真，能极大地缩短产品的设计周期。

ADS主要应用于：**射频与微波电路的设计**，通信系统链路的设计，RFIC设计，DSP设计和向量仿真。

## 2. ADS主要仿真器

- 直流（DC）仿真控制器：如进行晶体管的直流工作点分析，一般作为其他分析的起始步骤
  - 检验所测试的设计的正确DC操作特性
  - 确定电路能量消耗
  - 通过将模型DC传输特性曲线（I-V曲线）与实际测量值比较，检验模型参数
  - 仿真结束后显示电压和电流
- 交流（AC）仿真控制器：相当于一个小信号分析仪，通常在确定DC工作点后，分析非线性器件在工作点附近时的线性特性，小信号AC仿真一般位于谐波平衡（频谱）仿真之前
  - 执行扫频或扫频变量小信号线性AC仿真
  - 获得小信号传输参数，如：电压和电流增益、跨导、导纳和线性噪声
- S参数仿真控制器：确定n端口电子器件在给定频率下的响应信号波形
  - 获取器件或电路的散射参数
  - 仿真群时延和线性噪声
  - 仿真频率改变对小信号的影响

- 谐波平衡（HB）仿真控制器：适合于模拟RF和微波电路，是一种非线性电路和系统失真的频域分析方法
  - 确定电流或电压的频谱成分
  - 计算参数，如：三阶截取点、总谐波失真及交调失真分量
  - 执行电源放大器负载激励回路分析
  - 执行非线性噪声分析
- 大信号S参数（LSSP）仿真控制器：非线性电路中大信号S参数的计算，属于HB仿真中的一种。大信号S参数当电平改变时会改变，因载波平衡仿真包括非线性影响。
- 增益压缩（XDB）仿真控制器：计算放大器或混频器的增益压缩点
- 包络（Envelope）仿真控制器：适合快速完全分析数字调制RF信号等复杂信号的时域和频域特性；瞬时仿真仅在载波和其谐波附近产生。
- 瞬态（Transient）仿真控制器：是SPICE最基本的仿真方法，常用于低频的模拟电路和数字电路仿真；不能胜任高频电路、宽带电路仿真，瞬态技术仿真；它能求解一组描述电路依赖时间的电压和电流的微积分方程，对于时间和/或扫频变量是非线性的

仿真功能描述	典型使用
<p><b>DC仿真控制器</b></p> <p>对于所有RF/模拟仿真是基本的。它表现为一个拓扑检查及一个DC操作点的分析</p>	<p>所有RF/模拟设计</p>
<p><b>AC仿真控制器</b></p> <p>获取小信号传输参数如电压增益、电流增益及线性噪声电压和电流</p>	<p>滤波器、放大器</p>
<p><b>S参数仿真控制器</b></p> <p>提供S参数、线性噪声参数、跨导及导纳；可用来达到AC仿真的很多目的</p>	<p>滤波器、振荡器、放大器、混频器</p>
<p><b>HB仿真控制器</b></p> <p>利用非线性谐波平衡技术来寻求在频域稳定状态的解决办法</p>	<p>混频器、振荡器、功率放大器、无线电接收机</p>
<p><b>LSSP仿真控制器</b></p> <p>执行大信号S参数分析来描述非线性行为。附随的P2D仿真器可以加快随后的分析</p>	<p>功率放大器</p>
<p><b>XDB仿真控制器</b></p> <p>寻求一个用户定义的增益压缩点，在那一点上实际功率曲线偏离理想线性功率曲线</p>	<p>功率放大器、混频器</p>
<p><b>瞬态仿真控制器</b></p> <p>完全在时域中利用一个简化的模型解决非线性来说明分布式元件的频率响应</p>	<p>混频器、功率放大器、开关电路</p>

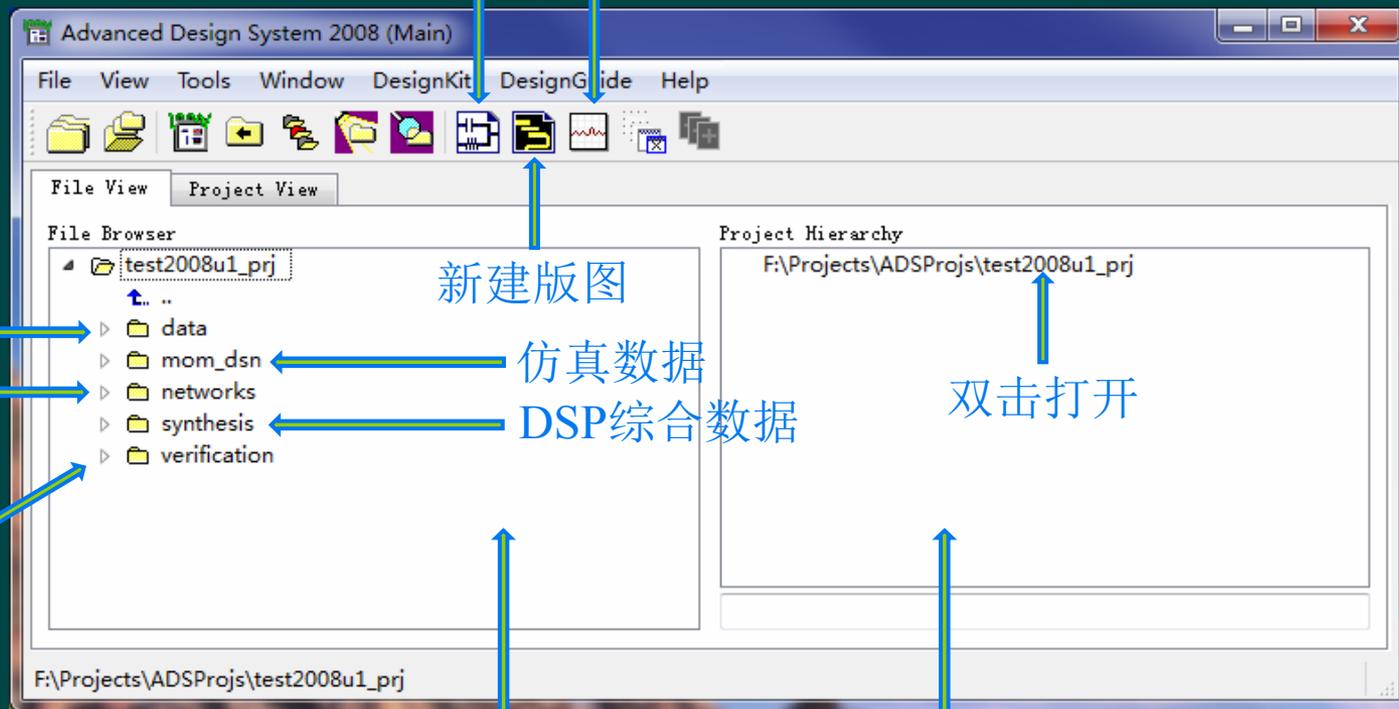
# 3. ADS操作基础

- 四窗口：主窗口、原理图窗口、版图窗口和数据显示窗口

- 主窗口

新建原理图

新建数据显示窗口



新建版图

仿真数据  
原理图&版图  
仿真工程文件

仿真数据  
DSP综合数据

双击打开

设计过程检测数据

文件浏览器

工程管理区

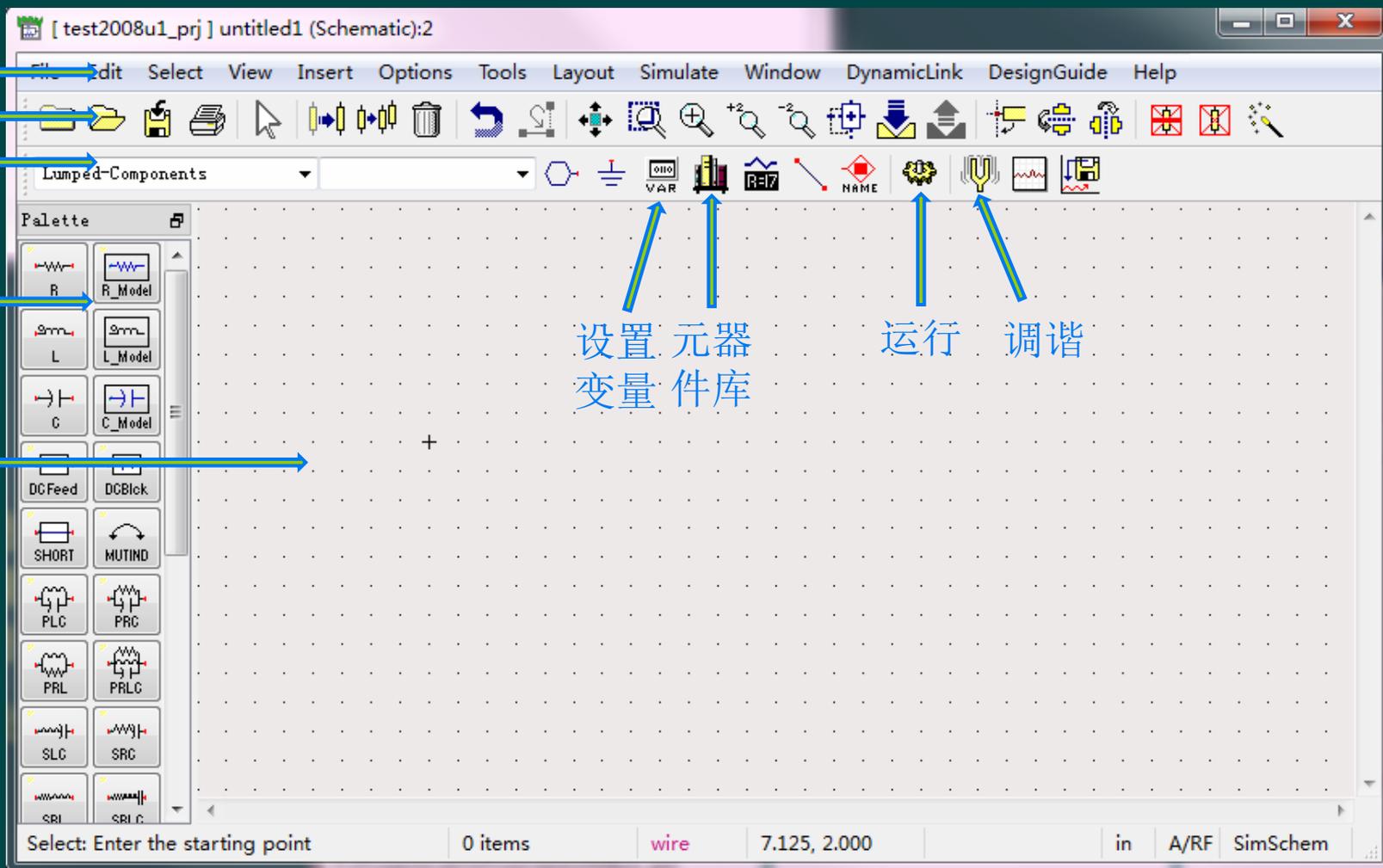
- 一次只可打开一个项目
- 利用File>Include/Remove Projects 可链接子项目

# ● 原理图窗口

菜单栏  
工具栏  
元器件  
库列表

元器件  
列表

原理图  
编辑区

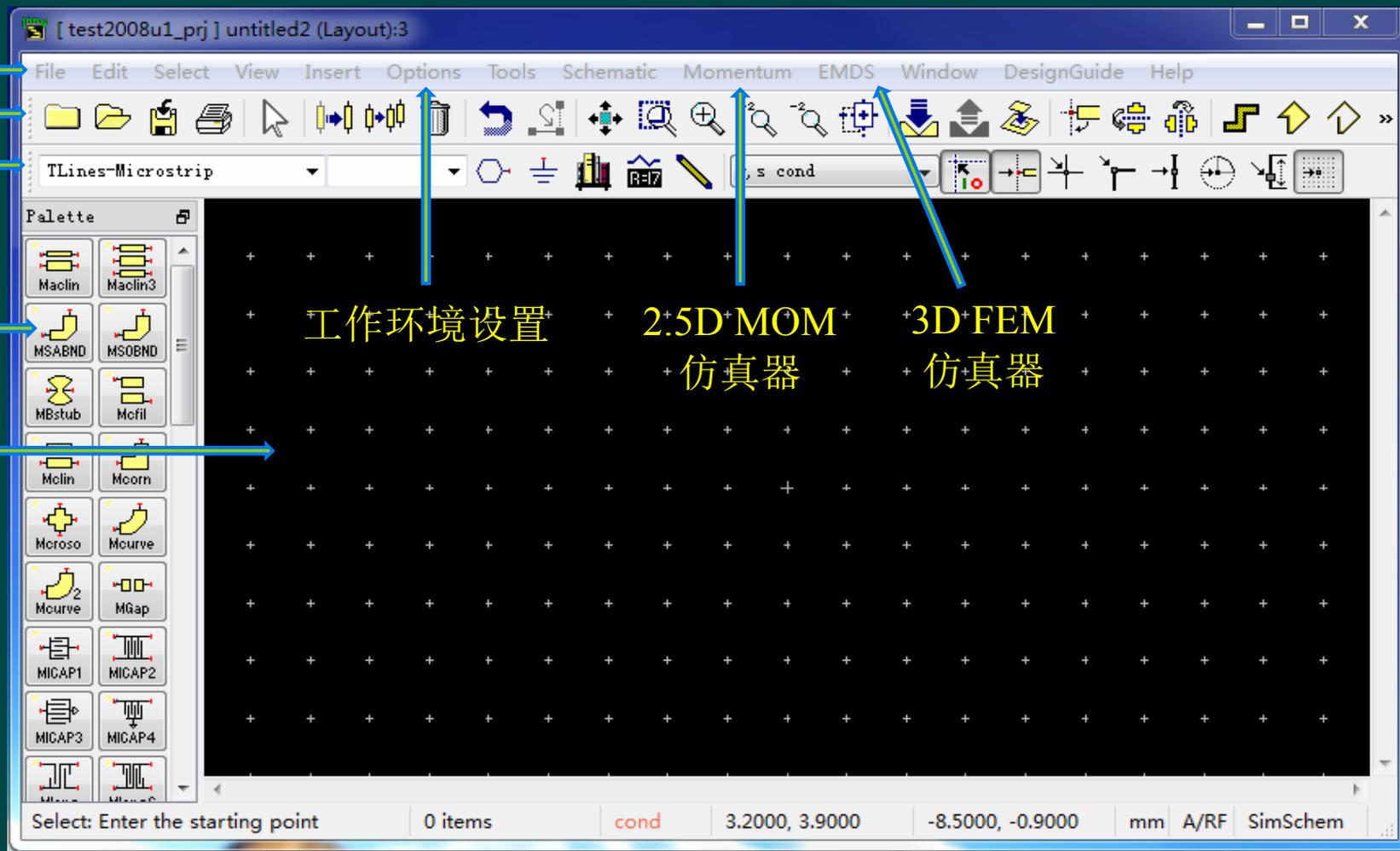


# ● 版图窗口

菜单栏  
工具栏  
元器件  
库列表

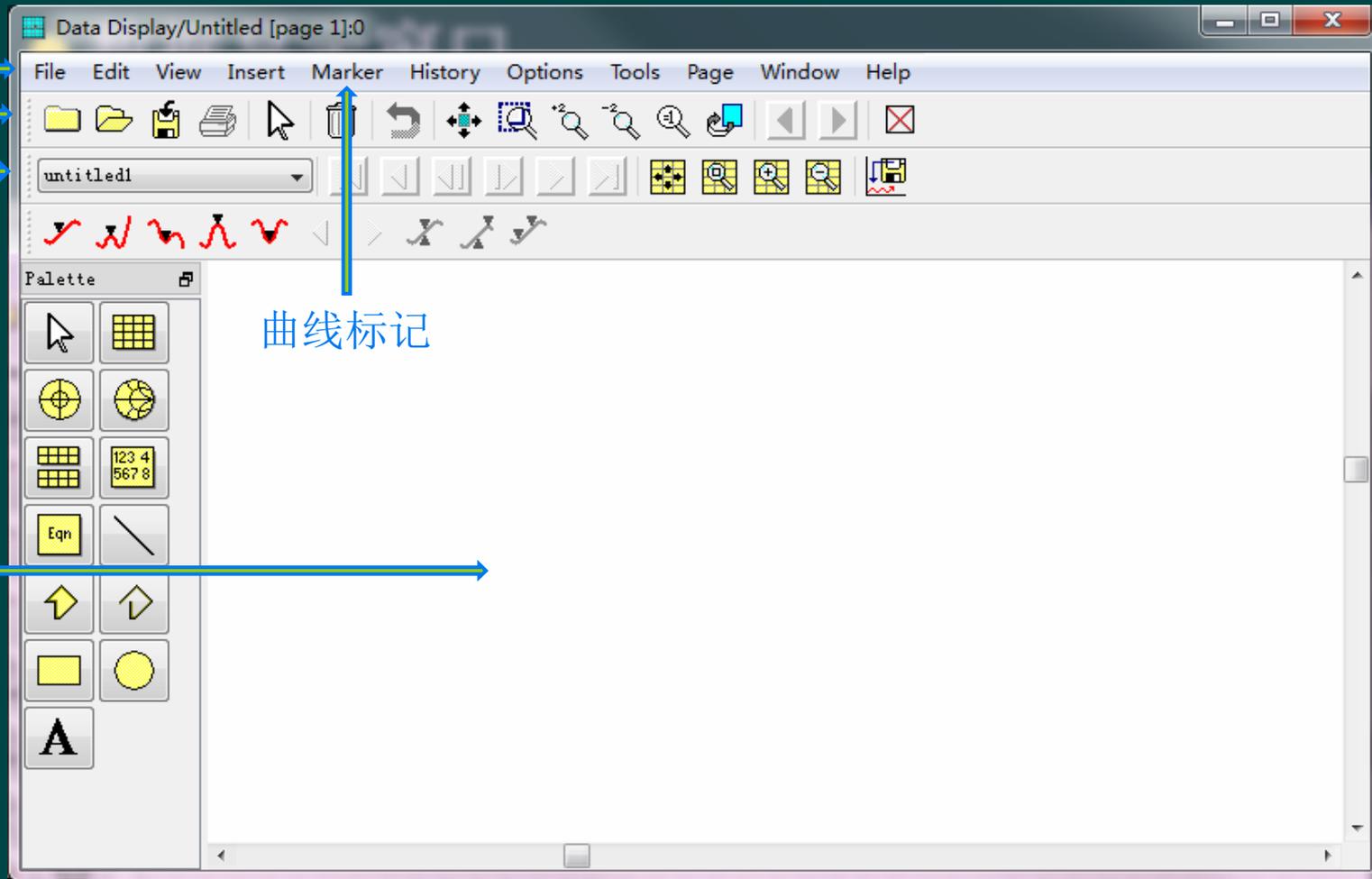
元器件  
列表

版图  
编辑区



# ● 数据显示窗口

菜单栏  
工具栏  
项目列表



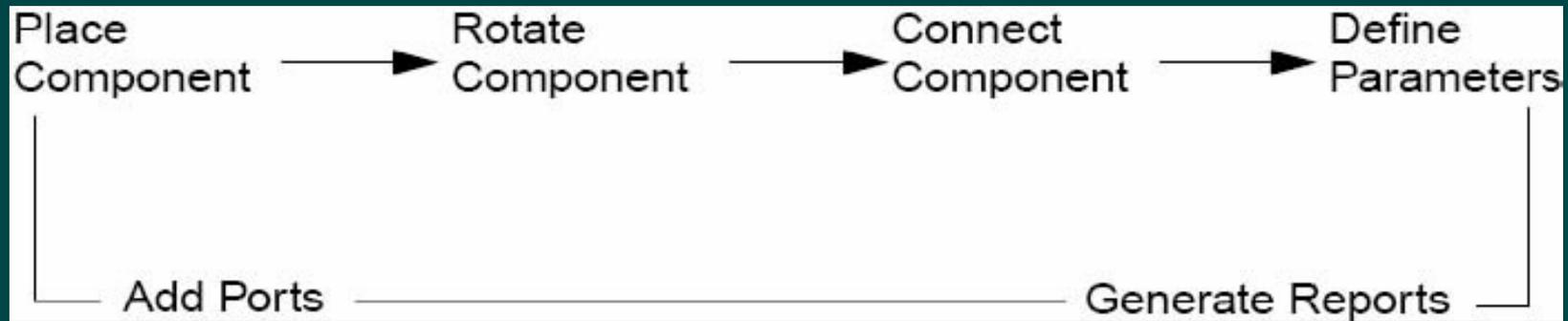
曲线标记

数据图  
放置窗口

在原理图或版图设计窗口，可以

- 创建和修改电路图和布局图
- 添加变量和方程
- 放置和修改元件、封装及仿真控制器
- 指定层及显示参数
- 使用文本和说明插入注释
- 由原理图生成布局图（及从布局图到原理图）

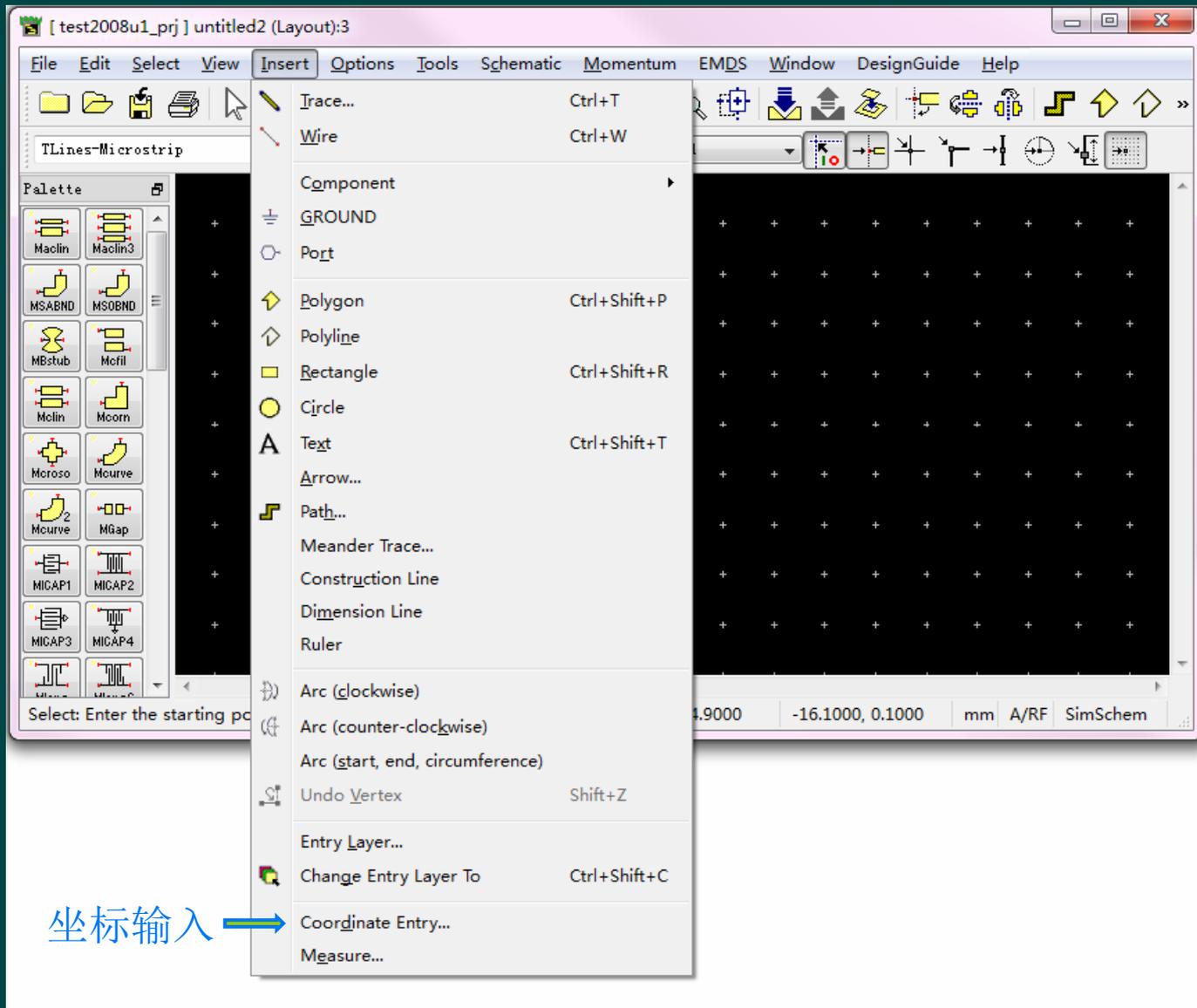
创建一个设计和布局图的基本步骤：



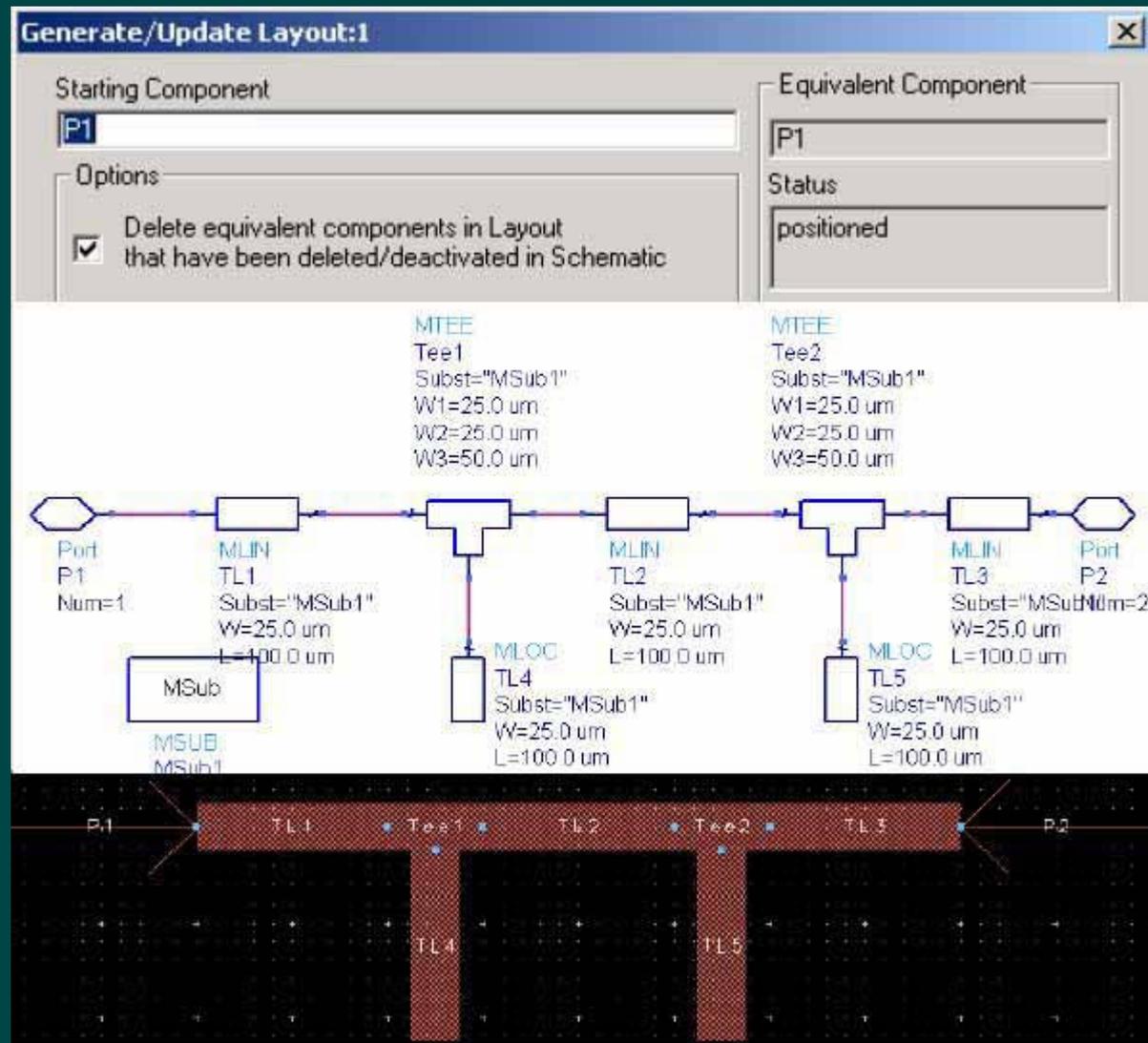
● 添加元件—在设计窗口中放置、连接及设置：

- 元件
- 数据项
- 测试源
- 仿真控制器
- 添加整个电路作为子网络进行分级设计

● 在版图窗口中绘制外形:

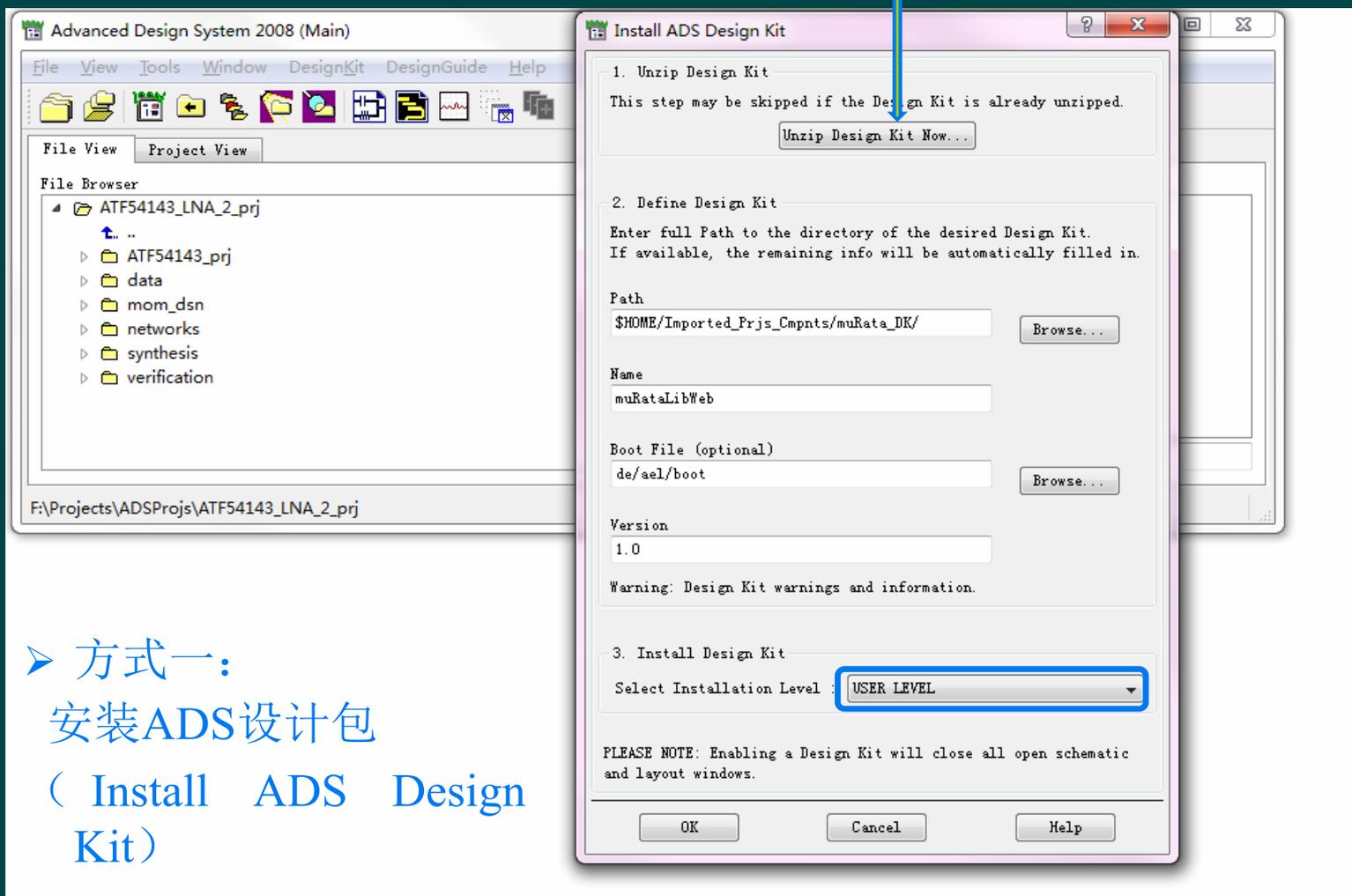


- 同步设计—使用命令 Schematic window>Layout>Generate/Update Layout 或者 Layout window>Schematic>Generate/Update Schematic 来生成及同步原理图和版图。



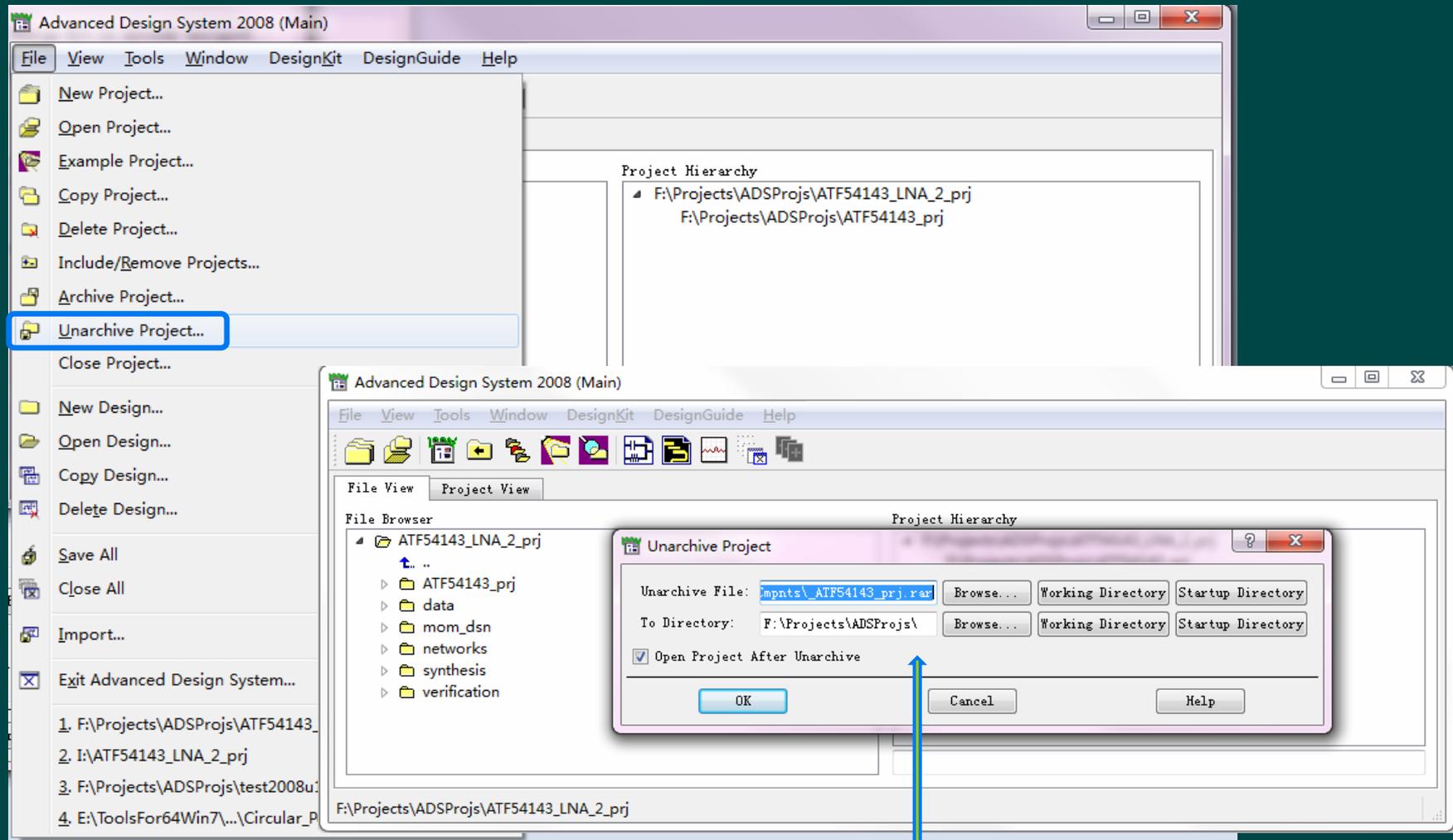
- 可以从各大软件厂商如Murata、NEC等公司官网上下载ADS元件库，通过以下两种方式可以导入至ADS的设计环境中：

解压缩下载的元件库文件（通常是.zap或.zip格式）



➤ 方式一：  
安装ADS设计包  
(Install ADS Design Kit)

## ➤ 方式二：对压缩项目解档



点击Unarchive Project...后出现，Project通常为.zip格式，解压后可由Include/Remove Projects加载

# 11.2 低噪放设计

## 1. 理论回顾

当今，人们对各种无线通信工具的要求越来越高，如辐射功率要小、作用距离要远、覆盖范围要广，对接收机灵敏度提出了更高的要求：

$$S_{\min}(\text{dBm}) = -114(\text{dBm/Hz}) + \text{NF}(\text{dB}) + 10\log \text{BW}(\text{MHz}) + S/N(\text{dB})$$

从上式看出，一旦系统带宽BW和信噪比S/N确定之后，对系统灵敏度起决定作用的就只有NF了，而由多级级联放大器的噪声系数公式：

$$\text{NF} = \text{NF}_1 + (\text{NF}_2 - 1)/G_1 + (\text{NF}_3 - 1)/G_1G_2 + \dots$$

知第一级放大器的噪声在整个接收机中处于重要地位。因此，低噪放（LNA）的设计对整个接收系统是很重要的，它是提高灵敏度的关键手段之一。

LNA的性能取决于噪声系数、合理的增益和稳定性

- 噪声系数NF（或噪声温度 $T_e$ ）；
- 变换功率增益 $G_T$
- 稳定性和动态范围

## ● 增益、噪声和动态范围之间的关系

假设某接收机噪声系数为3dB，线性动态范围为50dB，接收机的匹配信号带宽为3.3MHz，最大输出信号电平为 $2V_{p-p}$ （50Ω系统）

接收接的灵敏度为：

$$S_{\min} = -114(\text{dBm/Hz}) + \text{NF}(\text{dB}) + 10\log \text{BW}(\text{MHz}) + S/N(\text{dB}) \approx -106 \text{ dBm}$$

接收机的最大输入信号电平功率为：

$$P_{\text{in}} = S_{\min} + \text{DR} = -56 \text{ dBm}$$

接收机的最大输出信号电平功率为：

$$P_{\text{out-1}} = \frac{1}{50} \left( \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{2}} \right)^2 = 10 \text{ dBm}$$

接收机的增益为66dB。

## ● 放大器稳定性

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

$$|\Delta| < 1$$

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11}^* \Delta| + |S_{21}S_{12}|} > 1$$

改善微波管稳定性的方法

- 串接阻抗负反馈（常用微带线替代）
- 在天线和放大器间加载铁氧体隔离器
- 在放大器输出口加载Π型阻性衰减器

### 3. 具体过程

采用Avago公司高电子迁移率晶体管（PHEMT）ATF54143芯片设计LNA，设计指标：

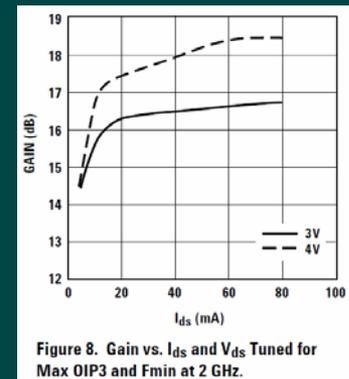
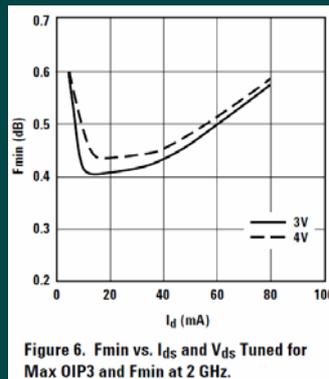
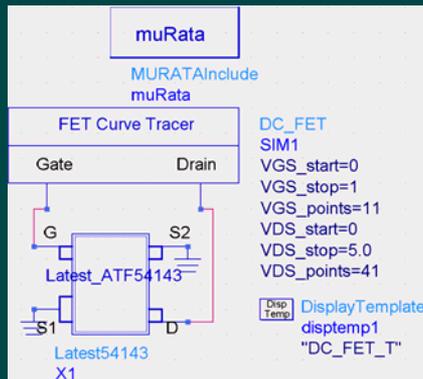
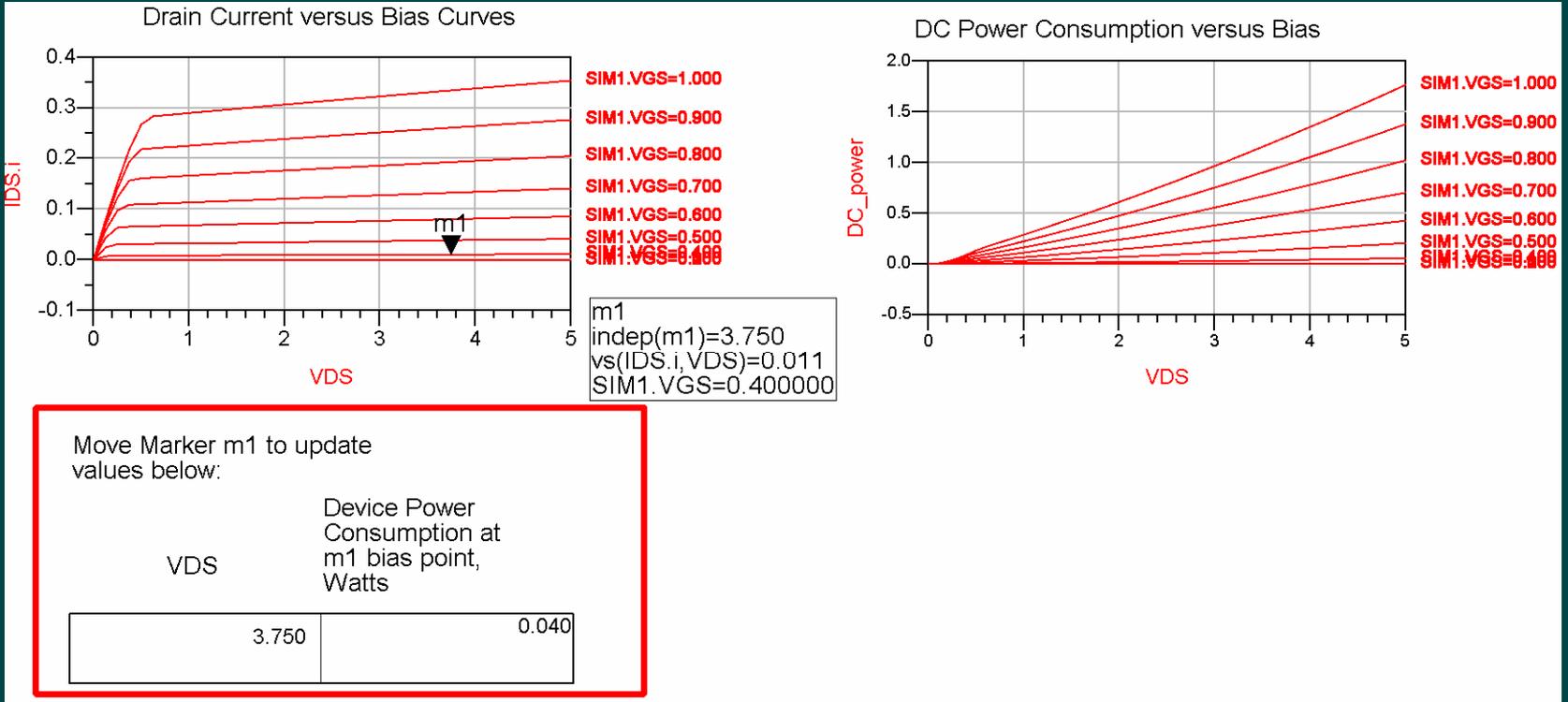
- 工作频率2.4~2.5 GHz;
- 噪声系数NF<0.7
- 增益Gain>15
- VSWRin<1.5, VSWRout<1.5

设计步骤为

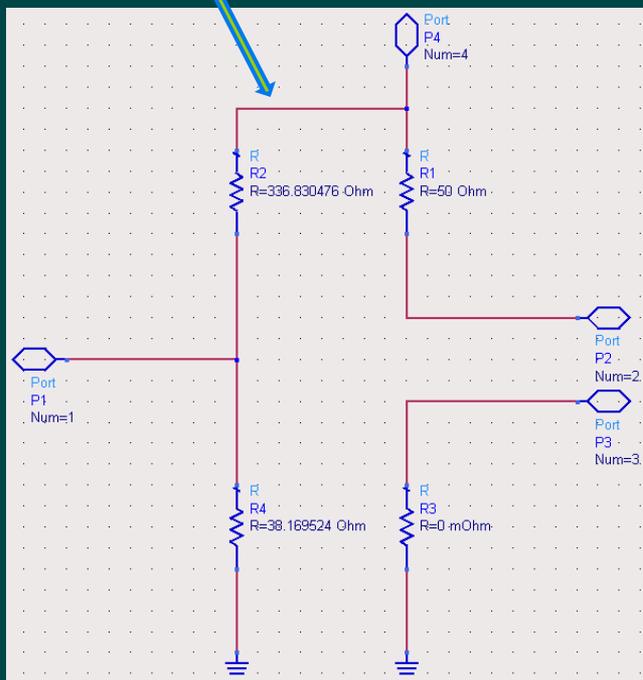
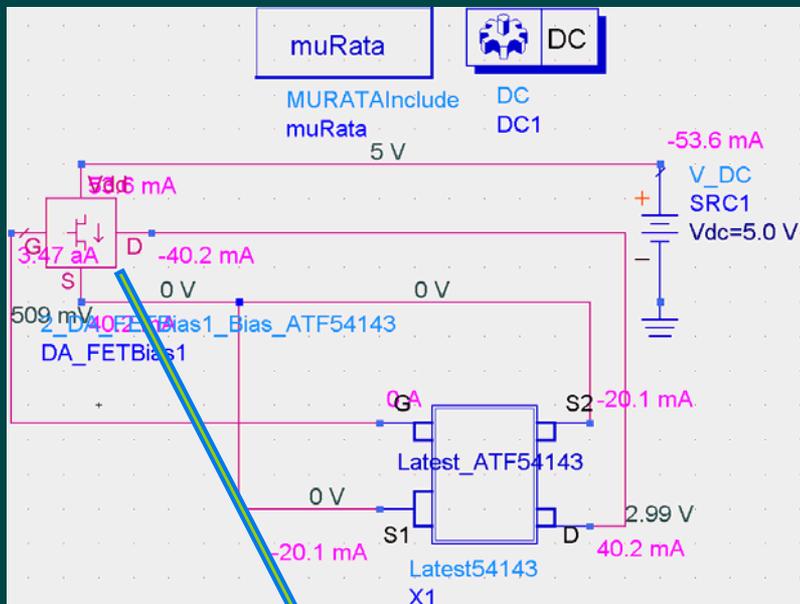
- 选定（安装）晶体管
- 直流分析
- 偏置电路设计
- 稳定性分析
- 噪声系数圆和输入匹配
- 最大增益的输出匹配
- 电路和版图的联合仿真

# 3. 具体过程

## I. 直流分析—确定晶体管的直流工作点



## II. 偏置电路设计—给FET提供合适的直流工作点



**Transistor Bias Utility**

File Tools View Help

Current Schematic: [ Seminar\_prj ]: 8  
SmartComponent: DA\_FETBias1

Current Design: 2\_Bias\_ATF54143  
SmartComponent Capability: Design, Simulate, Extract Parameters

Overview Resistive Networks Active Networks

**Bias Settings**

Vdd: 5 V  
Vds: 3 V  
Device Type: NFET  
Id: 40 mA

Include RF Chokes

Bias Point Selection

**Device Parameters**

Automatically Extract Device Parameters

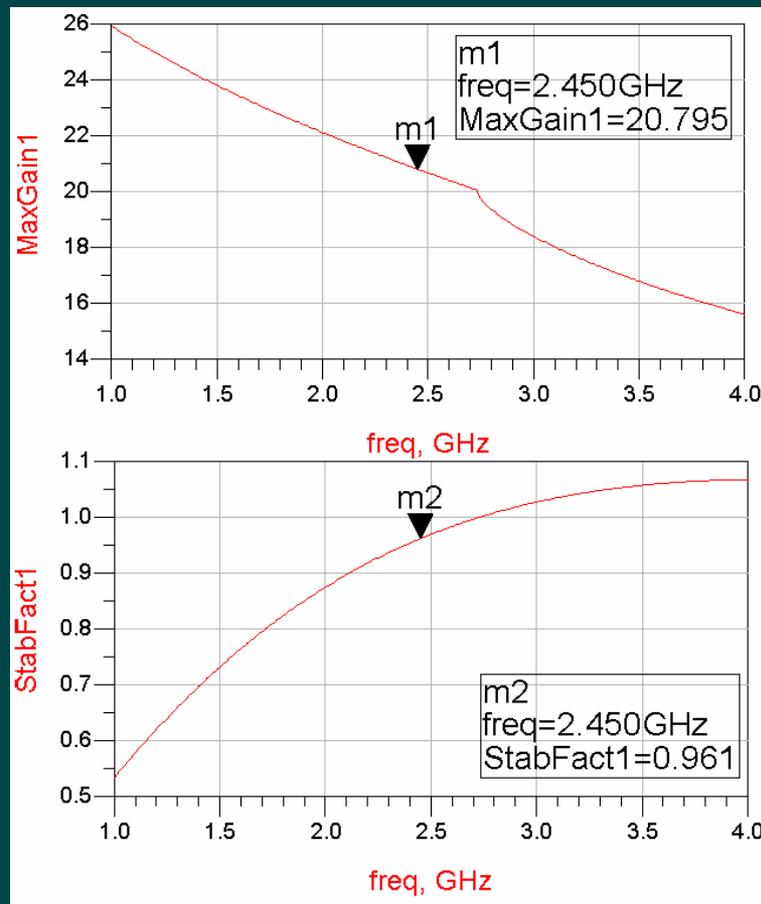
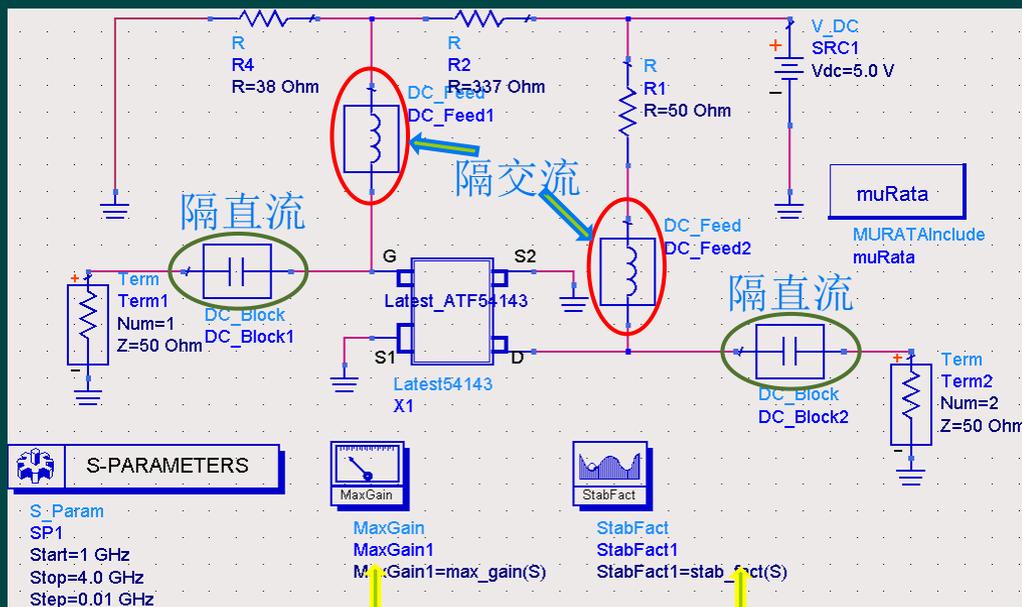
Device Parameters: Vt = 0.2615 V, K (A/V<sup>2</sup>) = 6.5338e-001  
Device Bias Point: Vgs = 0.5089 V

**Helps**

NFET: Vdd and Vds must be positive.  
PFET: Vdd and Vds must be negative.  
Id = K\*(Vgs - Vt)<sup>2</sup>

Design Help

### III. 稳定性分析—确使条件稳定的晶体管处于稳定工作区-1 (计算资用功率增益和稳定性系数 $K$ )

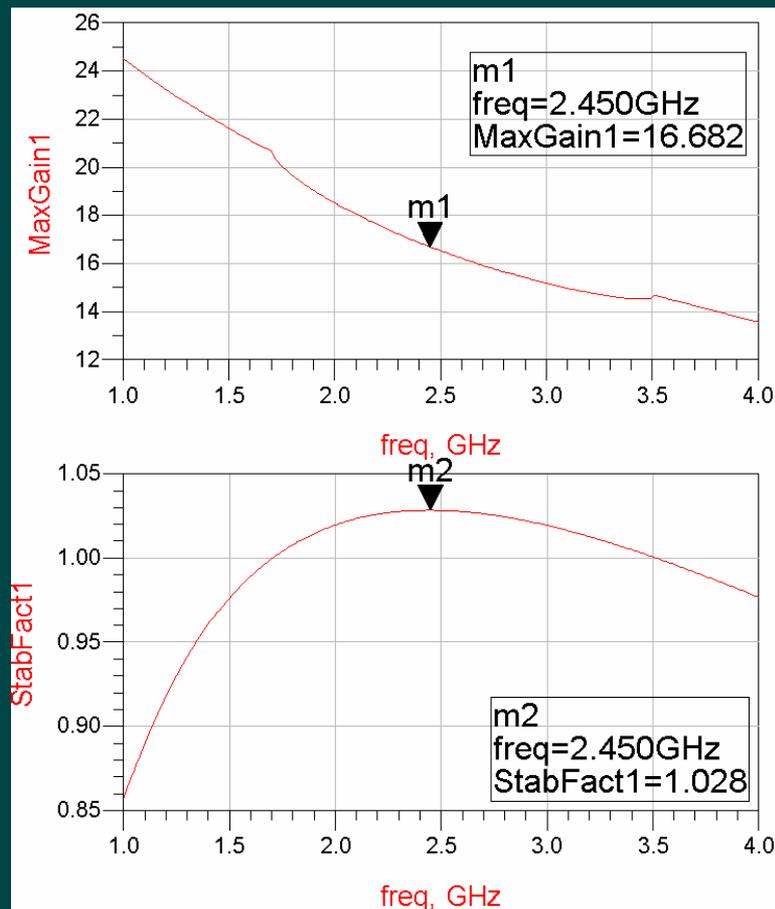
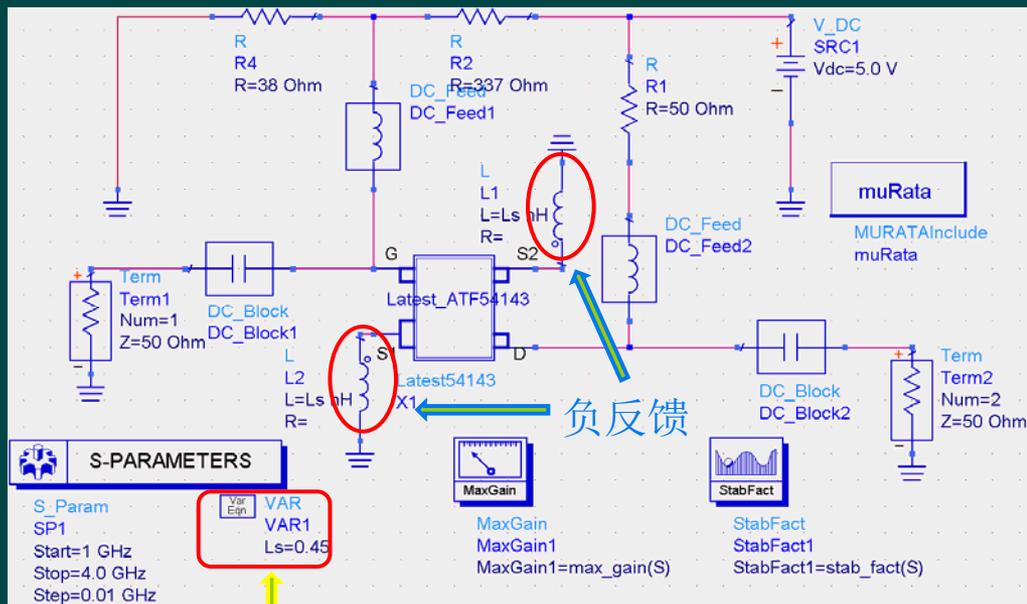


资用功率增益

稳定性系数 $K$

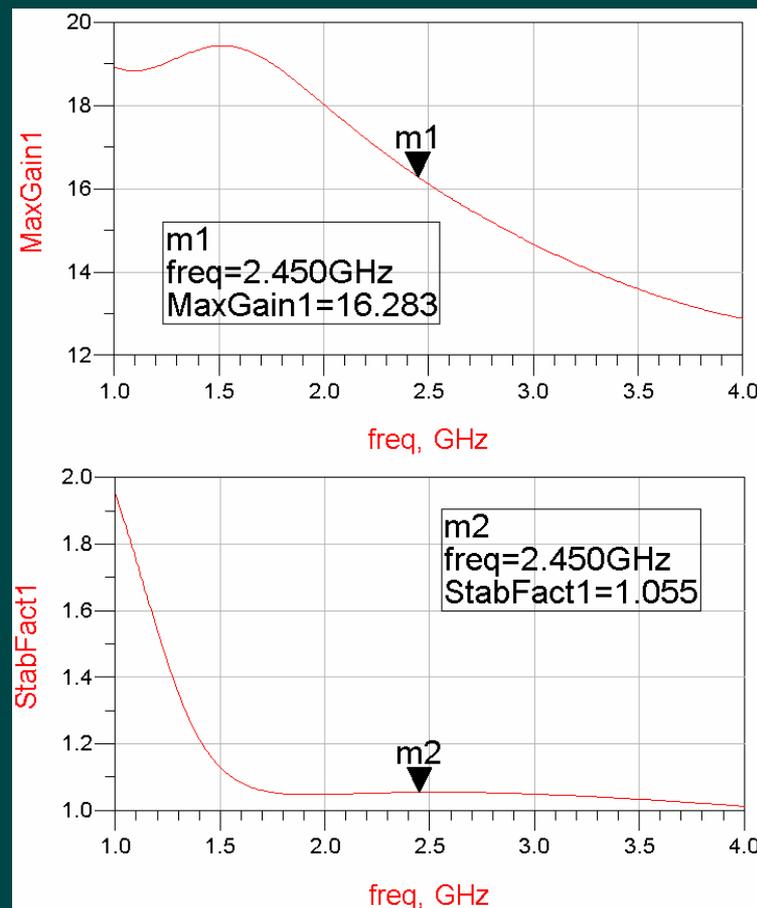
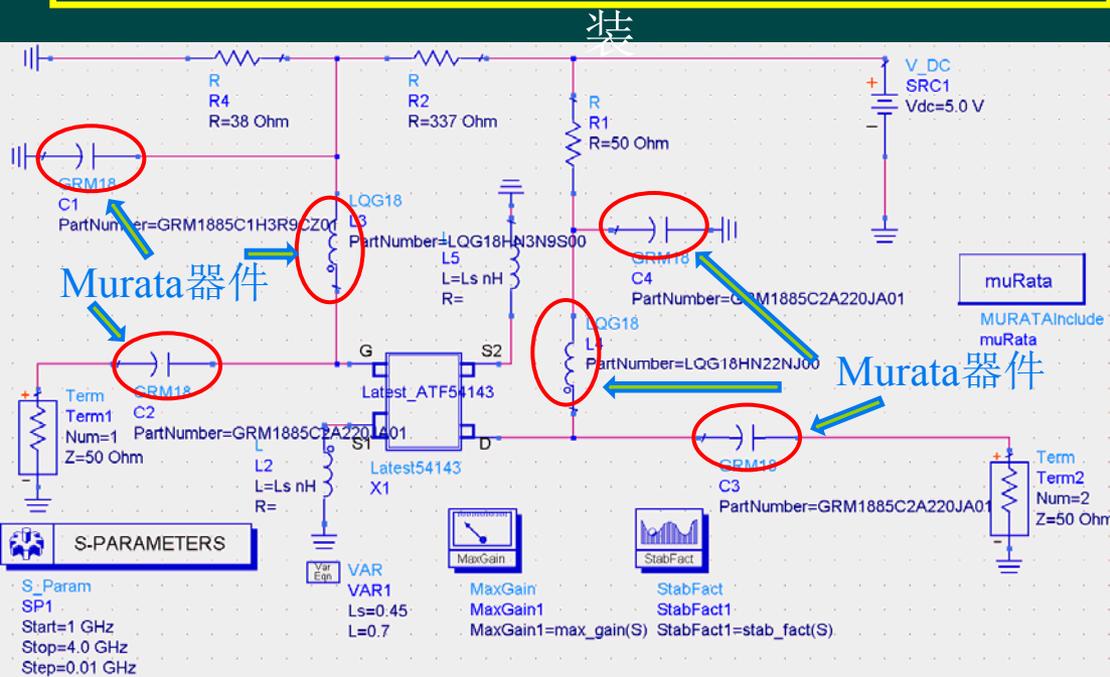
● 低频部分不稳定，且增益较高，易产生自激振荡

### III. 稳定性分析—确使条件稳定的晶体管处于稳定工作区-2 (引入负反馈)



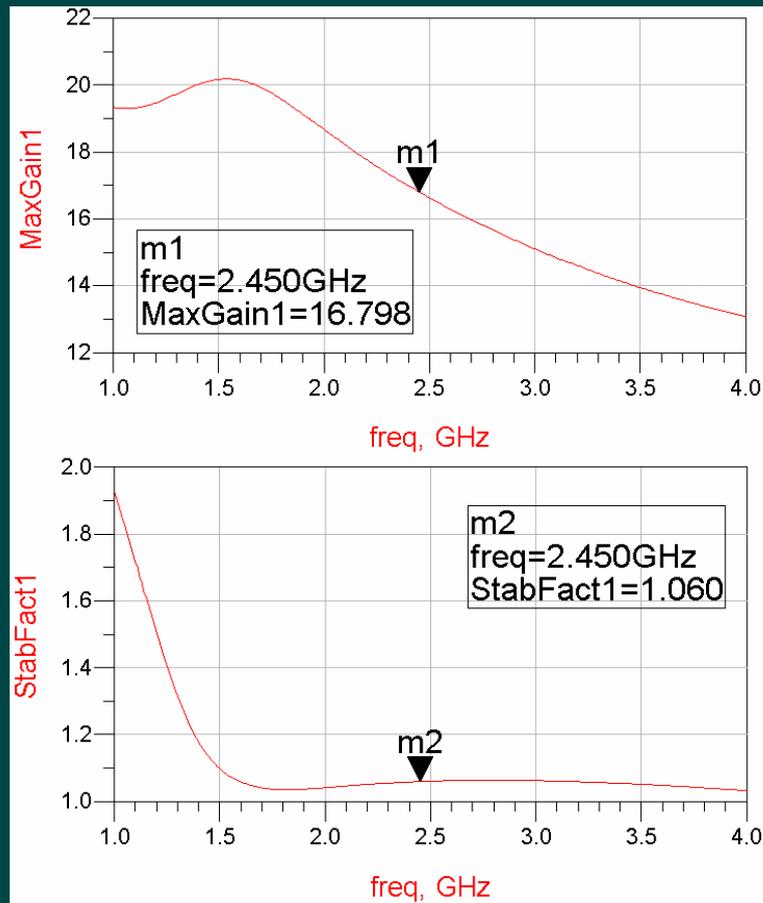
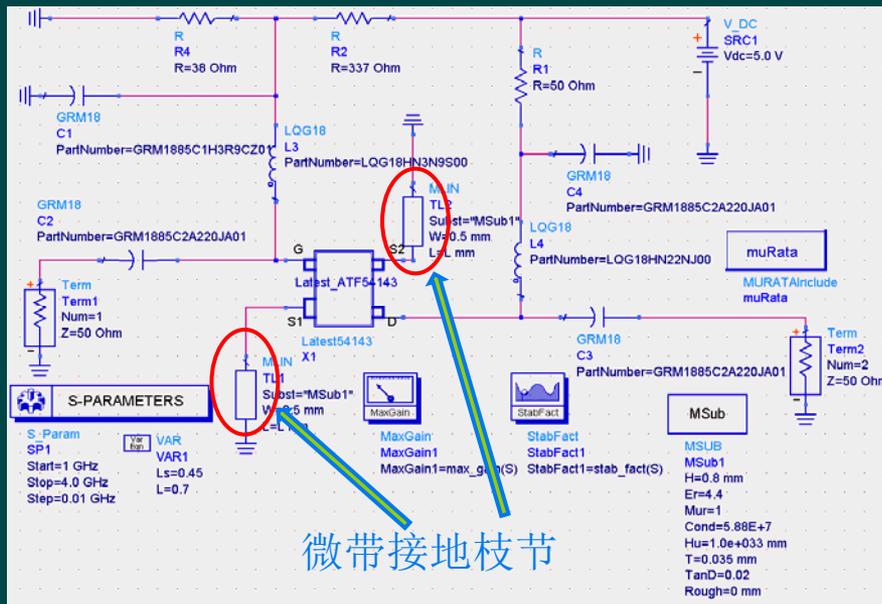
### III. 稳定性分析—确使条件稳定的晶体管处于稳定工作区-3 (将理想的DC\_Feed和DC\_Block用理想的Murata电感电容替代)

#### ● Murata电感电容具备同步设计所需的封装



### III. 稳定性分析—确保条件稳定的晶体管处于稳定工作区-4 (将源级处的小电感以微带接地枝节替换)

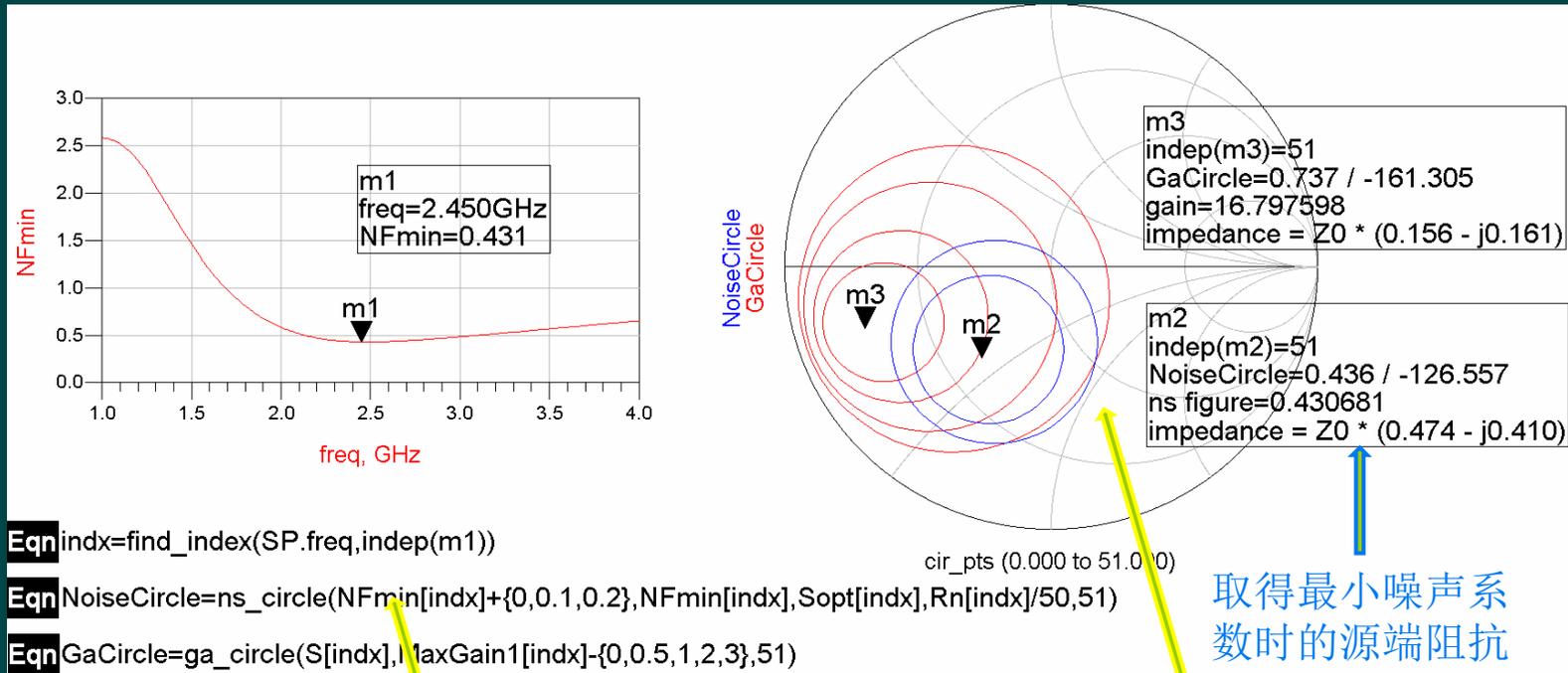
- 实际电感很难做到小的电感值；
- 分立集总电感寄生参数影响整个电路的稳定性



- 电小微带接地枝节的物理长度为

$$l = \frac{11.81L(\text{nH})}{Z_0 \sqrt{\epsilon_e}} \text{ (in)}$$

# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-1 (开启S参数仿真控制器中的线性噪声计算功能，计算等噪声系数圆和等增益圆)



取得最小噪声系数时的源端阻抗

源反射系数Smith圆图

Insert Measurement Equations

IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2  
(将 $50\ \Omega$ 变换至 $Z_0 \times (0.474 - j0.410) = (23.7 - j20.5)\ \Omega$ )

The image shows a circuit simulation environment with a Smith Chart Matching Network component. The component is represented by a Smith chart icon on a schematic. A blue arrow points from the component to a configuration dialog box titled "Smith Chart Matching Network:2".

The dialog box contains the following parameters:

- Instance Name (name[<start:stop>]): DA\_SmithChartMatch1
- Select Parameter:
  - Fp=2.45 GHz
  - SourceType=Resistive
  - SourceEnable=True
  - Rg=50 Ohm
  - Lg=1 nH
  - Cg=22 pF
  - Zg=(50-j\*2.9528) Ohm
  - SourceFile="ZSource.snp"
  - SourceFileSparm="S(1,1)"
  - SourceImpType=Source Impedance
  - LoadType=Complex Impedance
  - LoadEnable=True
  - RL=50 Ohm
  - LL=1 nH
  - CL=1 pF
  - ZL=(23.7-j\*20.5) Ohm
  - LoadFile="ZLoad.snp"
  - LoadFileSparm="S(1,1)"
  - LoadImpType=Output Impedance
  - Z0=50 Ohm

Additional parameters on the right side of the dialog box:

- Fp (Real, e.g. 1.25): 2.45 GHz
- Buttons: Equation Editor..., Tune/Opt/Stat/DOE Setup...
- Display parameter on schematic:
- Component Options...

On the schematic, a component labeled "Term1" is shown with the following parameters:

- Term1
- Num=1
- Z=50 Ohm

Below the schematic, there is a legend for the Smith Chart Matching Network component:

- S\_Param
- SP1
- Start=1
- Stop=4
- Step=0

The text "Smith圆图 匹配控件" is written in blue below the schematic.

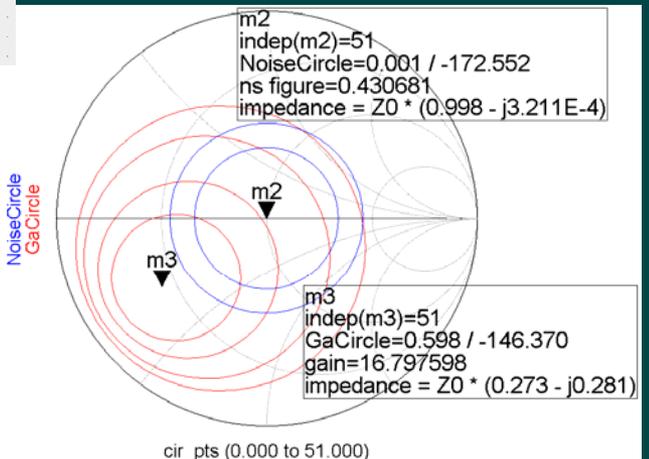
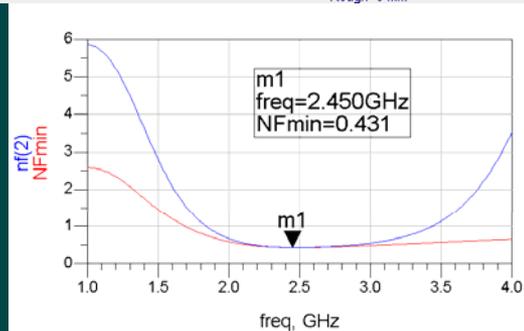
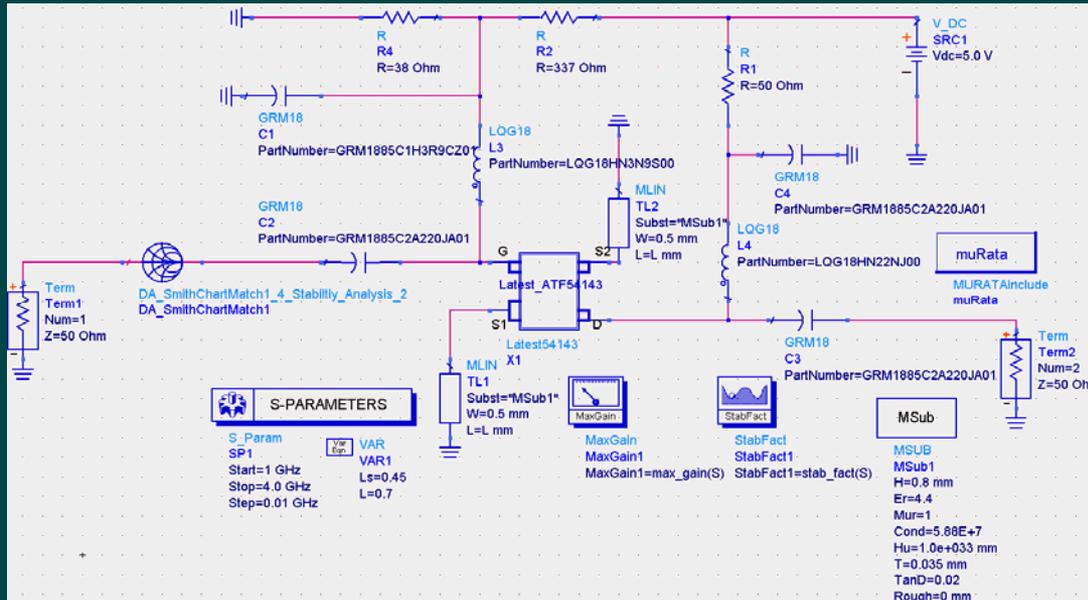
# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2 (将 $50\ \Omega$ 变换至 $Z_0 \times (0.474 - j0.410) = (23.7 - j20.5)\ \Omega$ )

The image shows the ADS Smith Chart Utility interface. The main window displays a Smith chart with a constant noise coefficient circle (labeled 0.5) and a constant SWR circle (labeled 10). A red box highlights the 'SmartComponent' dropdown menu, which is set to 'DA\_SmithChartMatch1'. A blue arrow points from the 'Define Source/Load Network Terminations...' button to the 'Network Terminations' dialog box. The dialog box has 'Enable Source Termination' and 'Enable Load Termination' checked. The 'Source Impedance' is set to 'Resistive' with a value of 50 Ohm. The 'Load Impedance' is set to 'Complex Impedance' with a value of  $(23.7 - j20.5)$  Ohm. A 'Build ADS Circuit' button is highlighted with a red box at the bottom left of the main window.

Network Terminations dialog box settings:

- Enable Source Termination
- Source Impedance: Resistive, R = 50 Ohm
- Enable Load Termination
- Load Impedance: Complex Impedance, Z = (23.7-j\*20) Ohm

# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2 (将 $50\ \Omega$ 变换至 $Z_0 \times (0.474 - j0.410) = (23.7 - j20.5)\ \Omega$ )



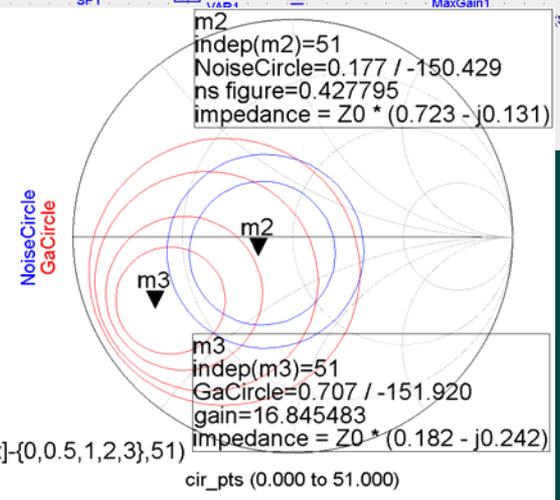
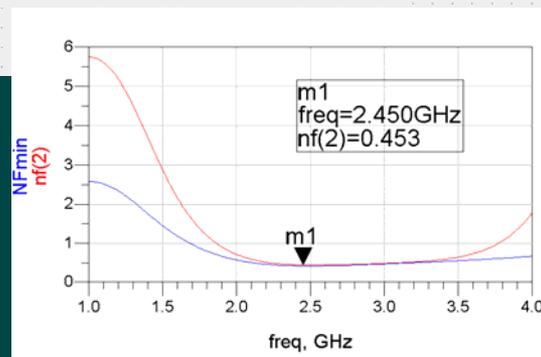
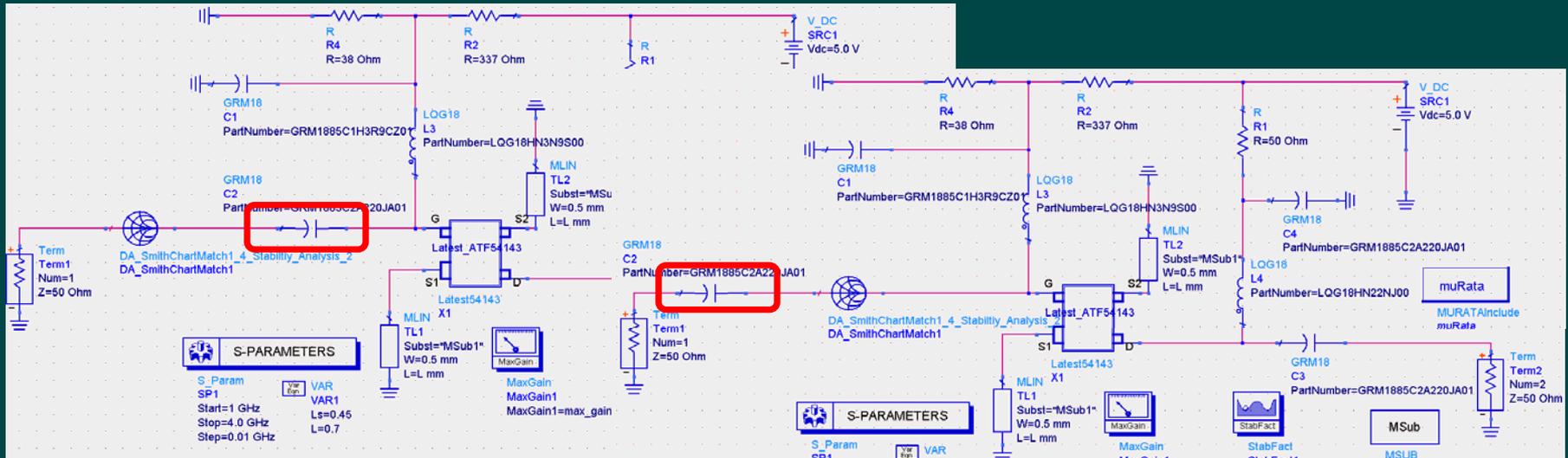
$$\text{Eqn } \text{indx} = \text{find\_index}(\text{SP.freq}, \text{indep}(\text{m1}))$$

$$\text{Eqn } \text{NoiseCircle} = \text{ns\_circle}(\text{NFmin}[\text{indx}] + \{0, 0.1, 0.2\}, \text{NFmin}[\text{indx}], \text{Sopt}[\text{indx}], \text{Rn}[\text{indx}] / 50, 51)$$

$$\text{Eqn } \text{GaCircle} = \text{ga\_circle}(\text{S}[\text{indx}], \text{MaxGain1}[\text{indx}] - \{0, 0.5, 1, 2, 3\}, 51)$$

cir\_pts (0.000 to 51.000)

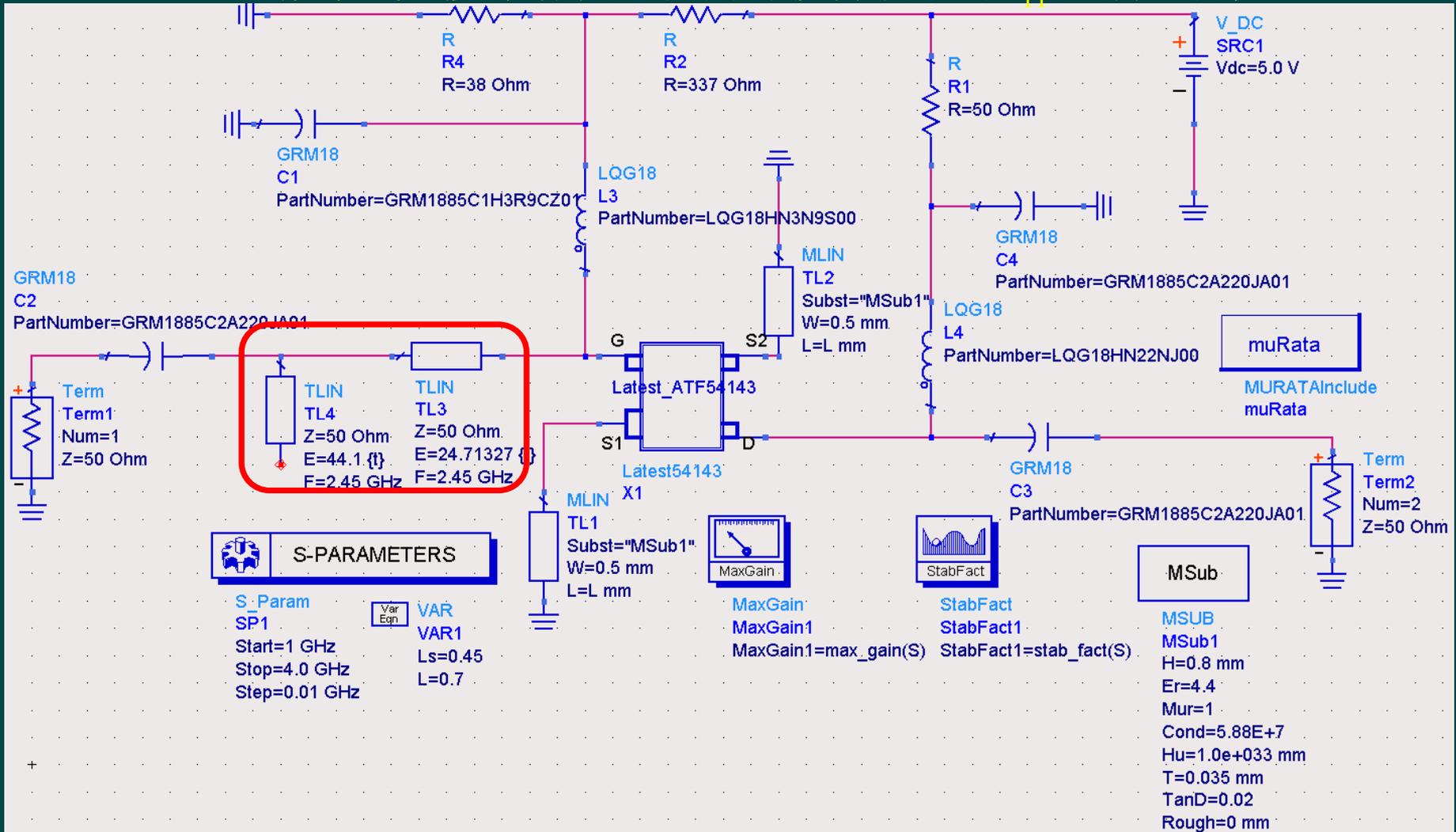
# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2 (输入端隔直电容应置于源端，此时导致噪声最优化点偏离 $50\ \Omega$ ，需调节微带线长度来补偿，以同时获得较小的 $S_{11}$ 和噪声系数)



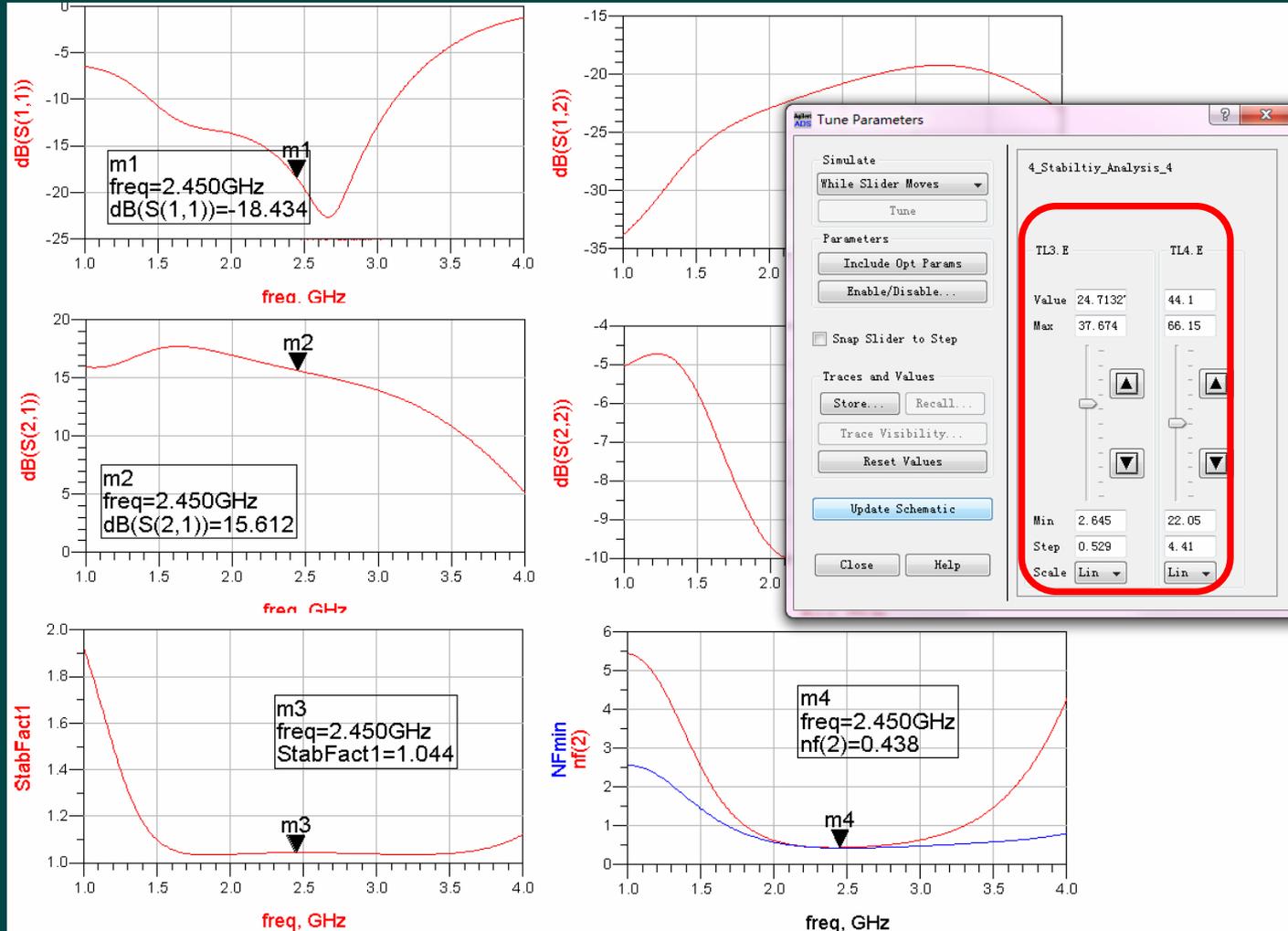
```
Eqn indx=find_index(SP.freq,indep(m1))
Eqn GaCircle=ga_circle(S[indx],MaxGain1[indx]-{0,0.5,1,2,3},51)
Eqn NoiseCircle=ns_circle(NFmin[indx]+{0,0.1,0.2},NFmin[indx],Sopt[indx],Rn[indx]/50,51)
```

# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2

(输入端隔直电容应置于源端，此时导致噪声最优化点偏离 $50\ \Omega$ ，需调节微带线长度来补偿，以同时获得较小的 $S_{11}$ 和噪声系数)

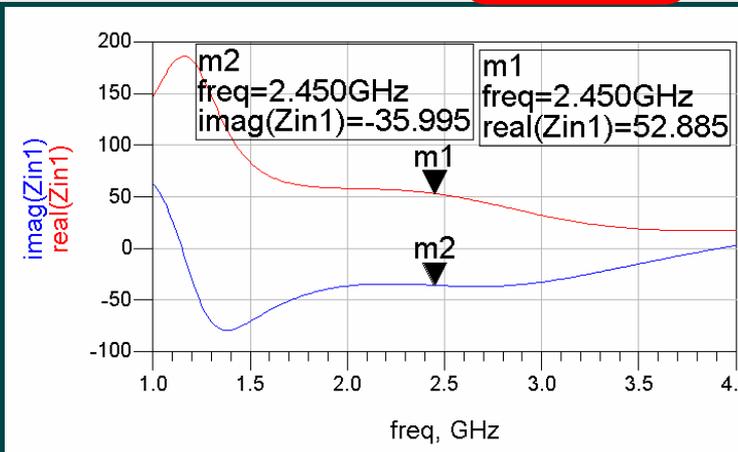
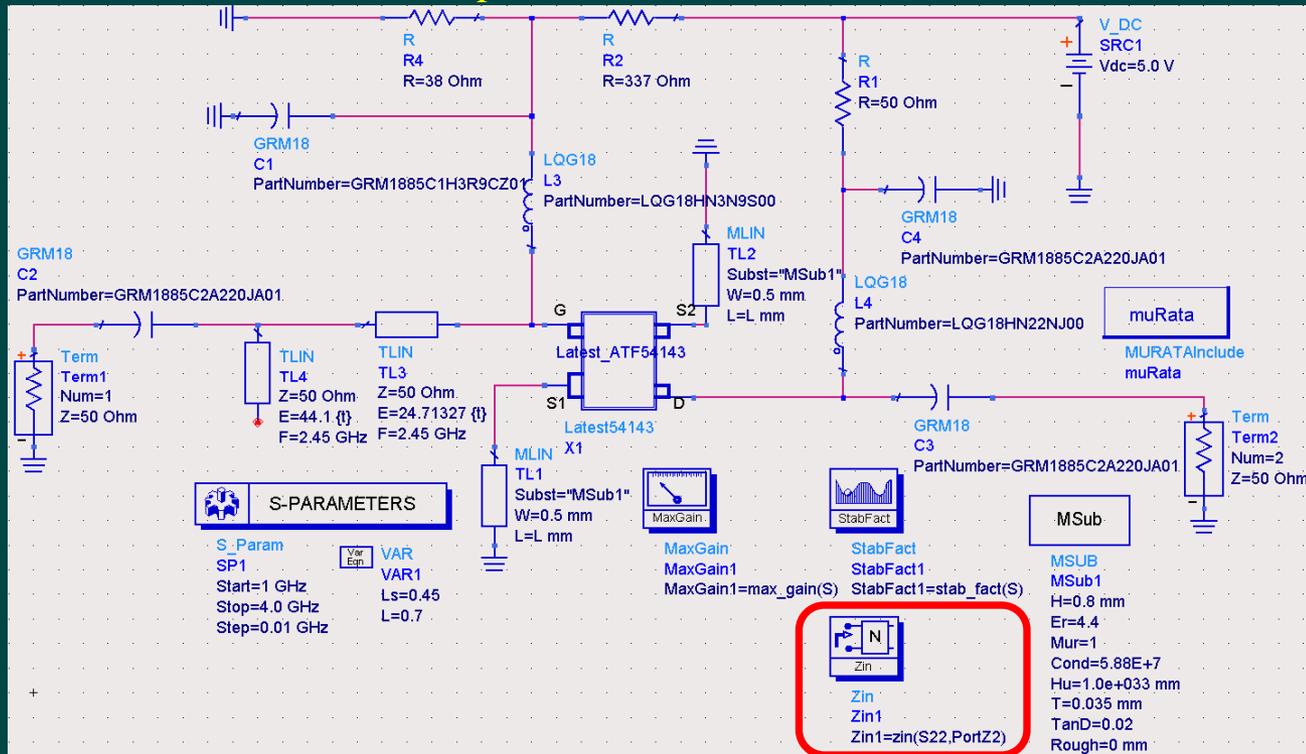


# IV. 等噪声系数圆和输入匹配—在噪声系数和输入增益间均衡选择输入匹配枝节，此处选择最小噪声系数时所需的输入匹配枝节-2 (输入端隔直电容应置于源端，此时导致噪声最优化点偏离 $50\ \Omega$ ，需调节微带线长度来补偿，以同时获得较小的 $S_{11}$ 和噪声系数)



# V. 最大增益的输出匹配-1

(由单向功率增益 $G_T$ 知, 应最大化输出匹配段的有效增益 $G_S$ )





## V. 最大增益的输出匹配-2

(由单向功率增益 $G_T$ 知, 应最大化输出匹配段的有效增益 $G_S$ )

The screenshot displays the ADS Smith Chart Utility interface. The main window shows a Smith chart with a green path indicating a matching process. A red box highlights the 'SmartComponent' dropdown menu, which is set to 'DA\_SmithChartMatch1'. Another red box highlights the 'Build ADS Circuit' button. A third red box highlights the 'Network Terminations' dialog box, which is open and shows the 'Enable Source Termination' and 'Enable Load Termination' options checked. The 'Source Impedance' is set to 'Complex Impedance' with a value of  $Z = (52.885 - j) \text{ Ohm}$ . The 'Load Impedance' is set to 'Resistive' with a value of  $R = 50 \text{ Ohm}$ . The 'Network Response' plot shows a red curve representing the magnitude of the transmission coefficient. The 'Network Schematic' shows a simple circuit with a source impedance  $ZS+$  and a load impedance  $ZL$ .

ADS Smith Chart Utility

File Edit View Circles Help

Palette

Freq (GHz) 2.45 Z0 (Ohms) 50 Normalize

Current Schematic [ Seminar\_prj ]: 1 SmartComponent DA\_SmithChartMatch1

Define Source/Load Network Terminations...

92.500 Deg

0.5 1 10 5 0.2 0.5 0.1 0.5

◆ Load ○ Source

Lock Source Impedance Lock Load Impedance

Gamma: 0.33044 < 65.7047 Z: 1.06394 +j 0.71941

VSWR: 1.98703 Y: 0.84500 +j -0.43614

Build ADS Circuit Auto 2-Element Match

Network Response

Max 0 Type dB Tracel S11 Trace2 S11 Min -60

Start Freq: 2.4e9 Stop Freq: 2.5e9 Reset

Network Schematic

◇ ZS+ P1 ◇ ZL P2

Network Terminations

Enable Source Termination Enable Load Termination

Source Impedance Complex Impedance Load Impedance Resistive

Z = (52.885 - j) Ohm R = 50 Ohm

L = 1 nH C = 1 pF

File = ZSource.sr S(1,1) Browse ... File = ZLoad.snp S(1,1)

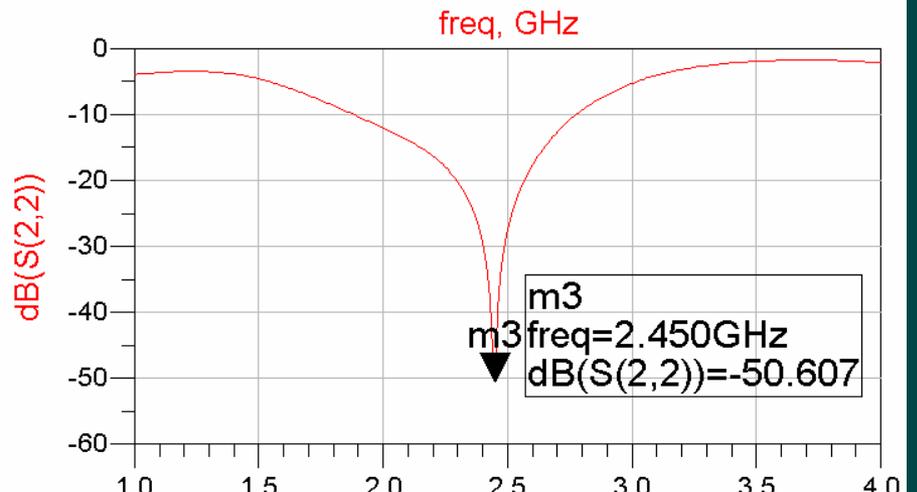
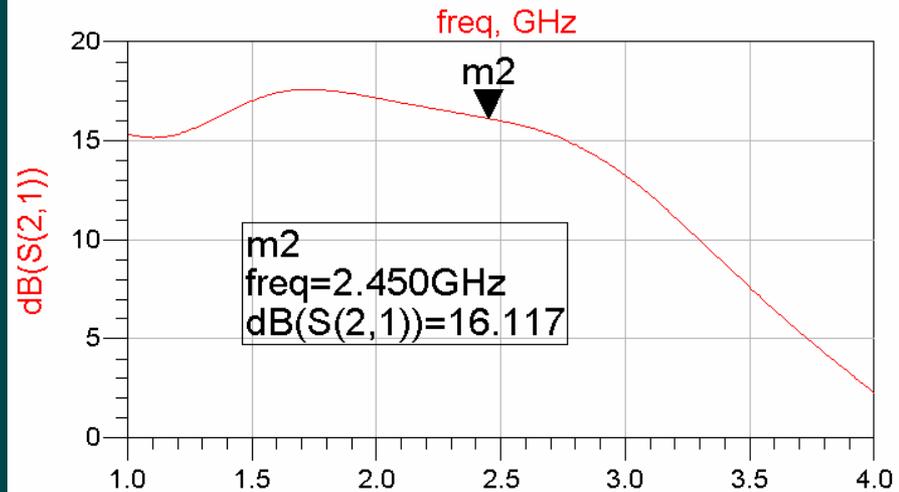
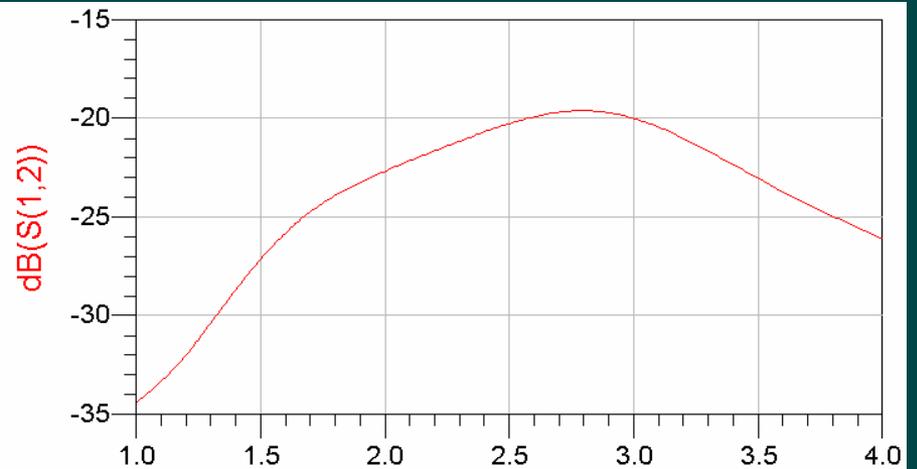
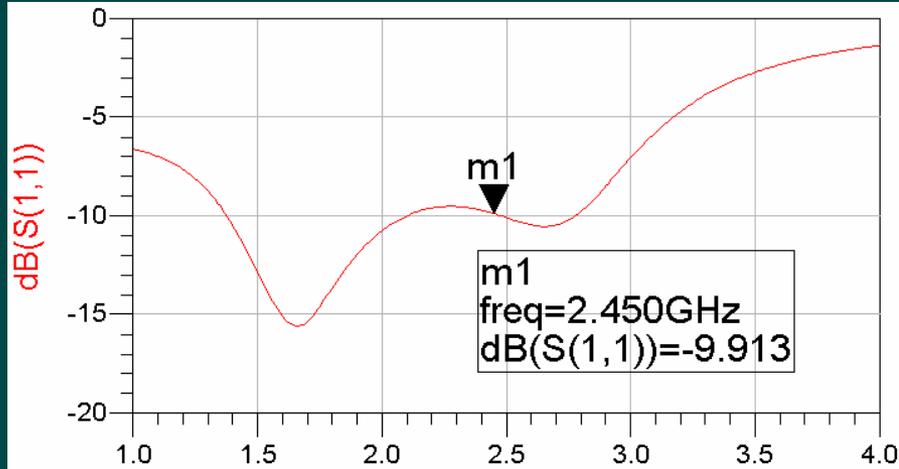
Interpret as Input Impedance Interpret as Output Impedance

Info

Selecting "Enable" for either Load or Source termination will use the imp

## V. 最大增益的输出匹配-2

(由单向功率增益 $G_T$ 知, 应最大化输出匹配段的有效增益 $G_S$ )

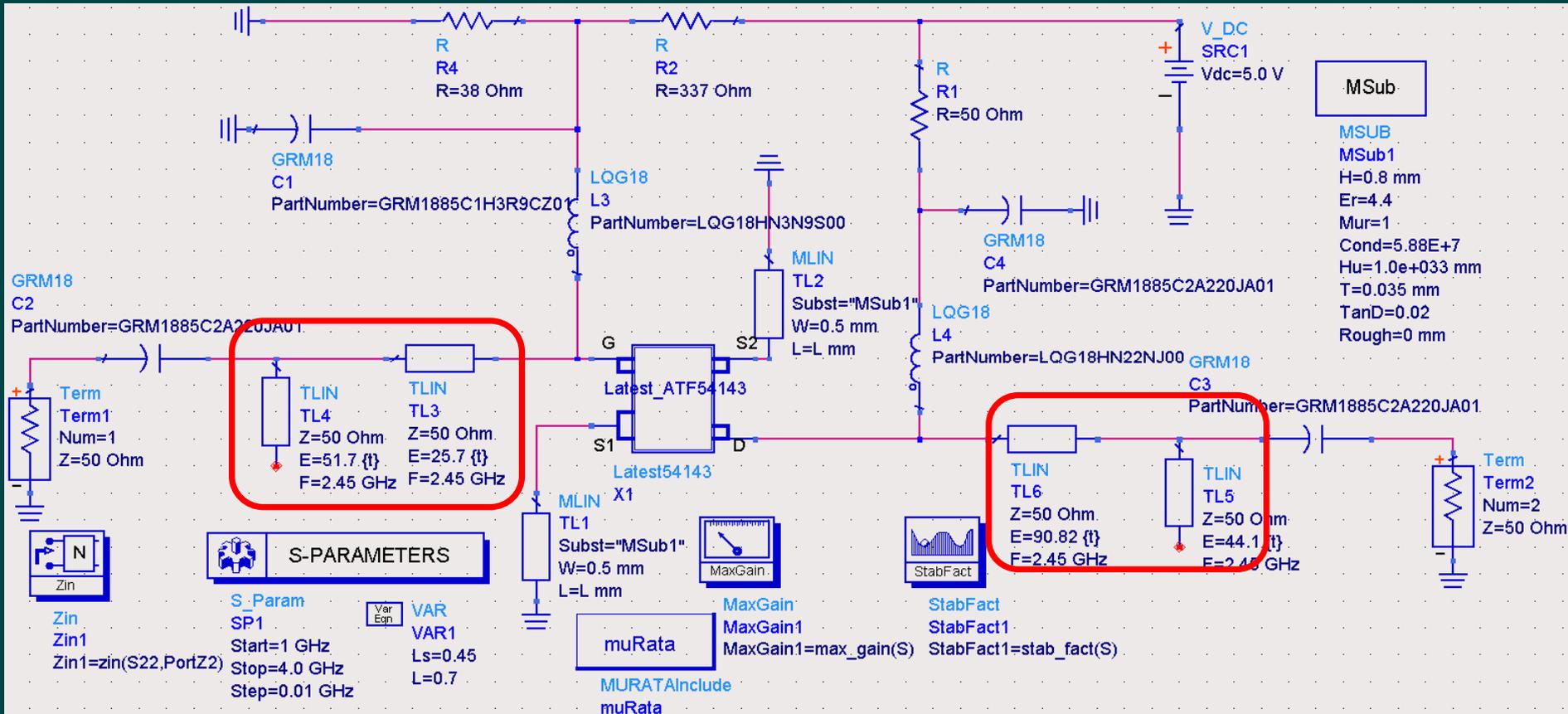


$\text{freq, GHz}$

$\text{freq, GHz}$

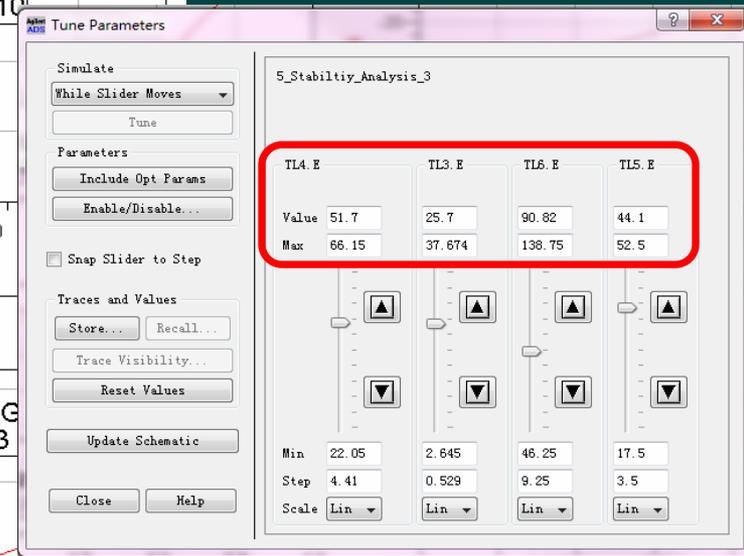
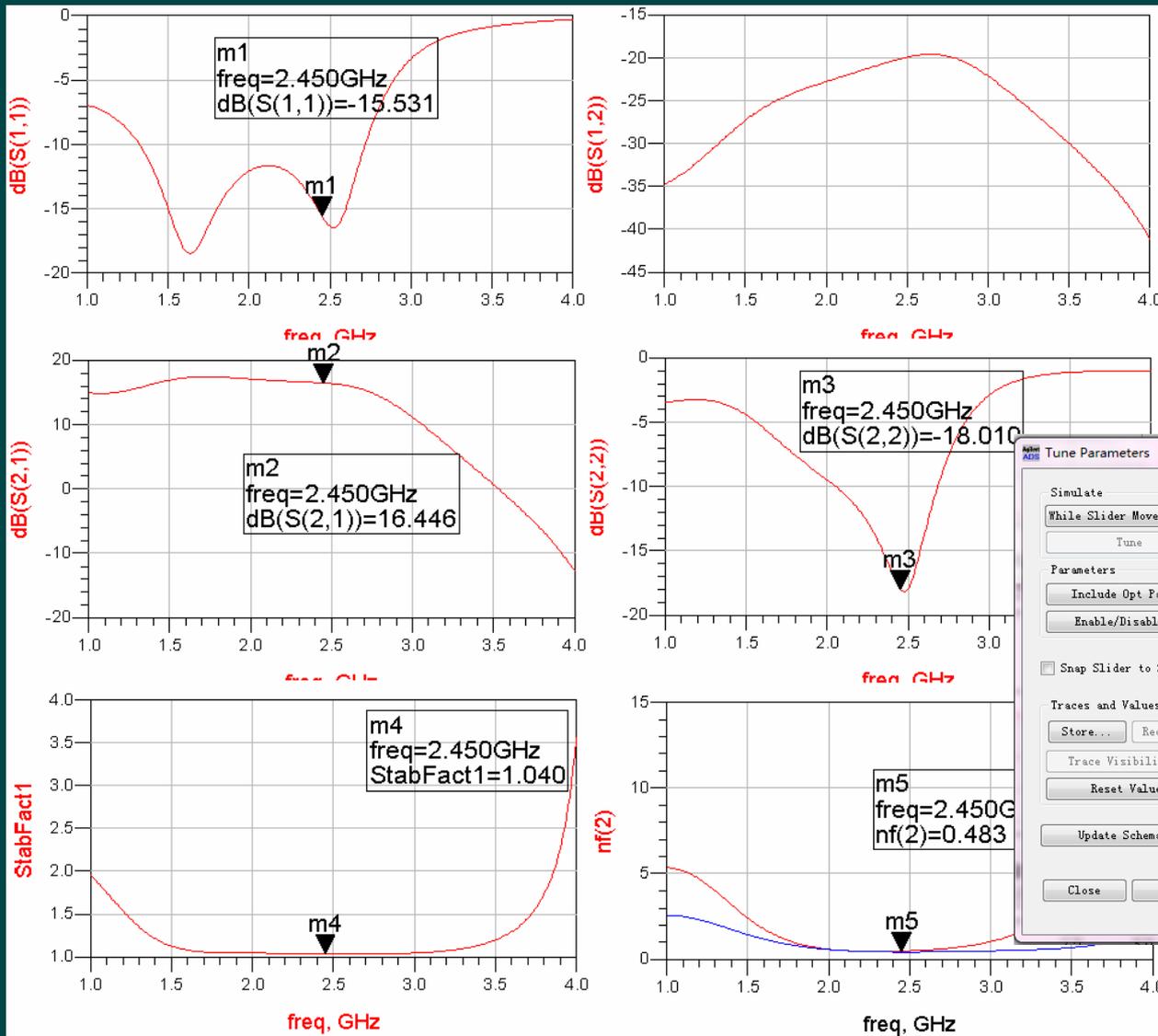
## V. 最大增益的输出匹配-2

(由单向功率增益 $G_T$ 知, 应最大化输出匹配段的有效增益 $G_S$ , 调谐匹配枝节的电长度, 在S参数、噪声系数和稳定性上取得平衡)



## V. 最大增益的输出匹配-2

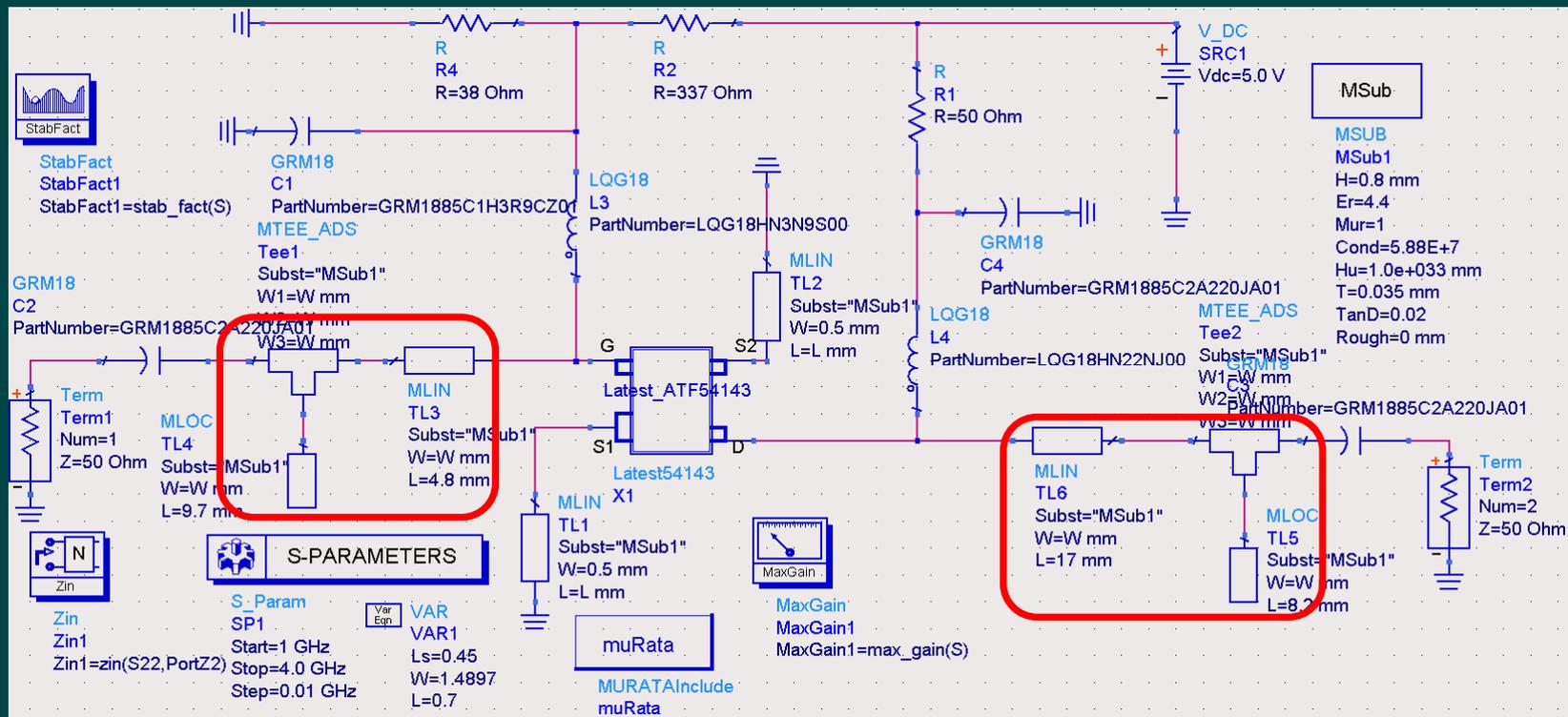
(由单向功率增益 $G_T$ 知, 应最大化输出匹配段的有效增益 $G_S$ , 调谐匹配枝节的电长度, 在S参数、噪声系数和稳定性上取得平衡)



## V. 最大增益的输出匹配-3

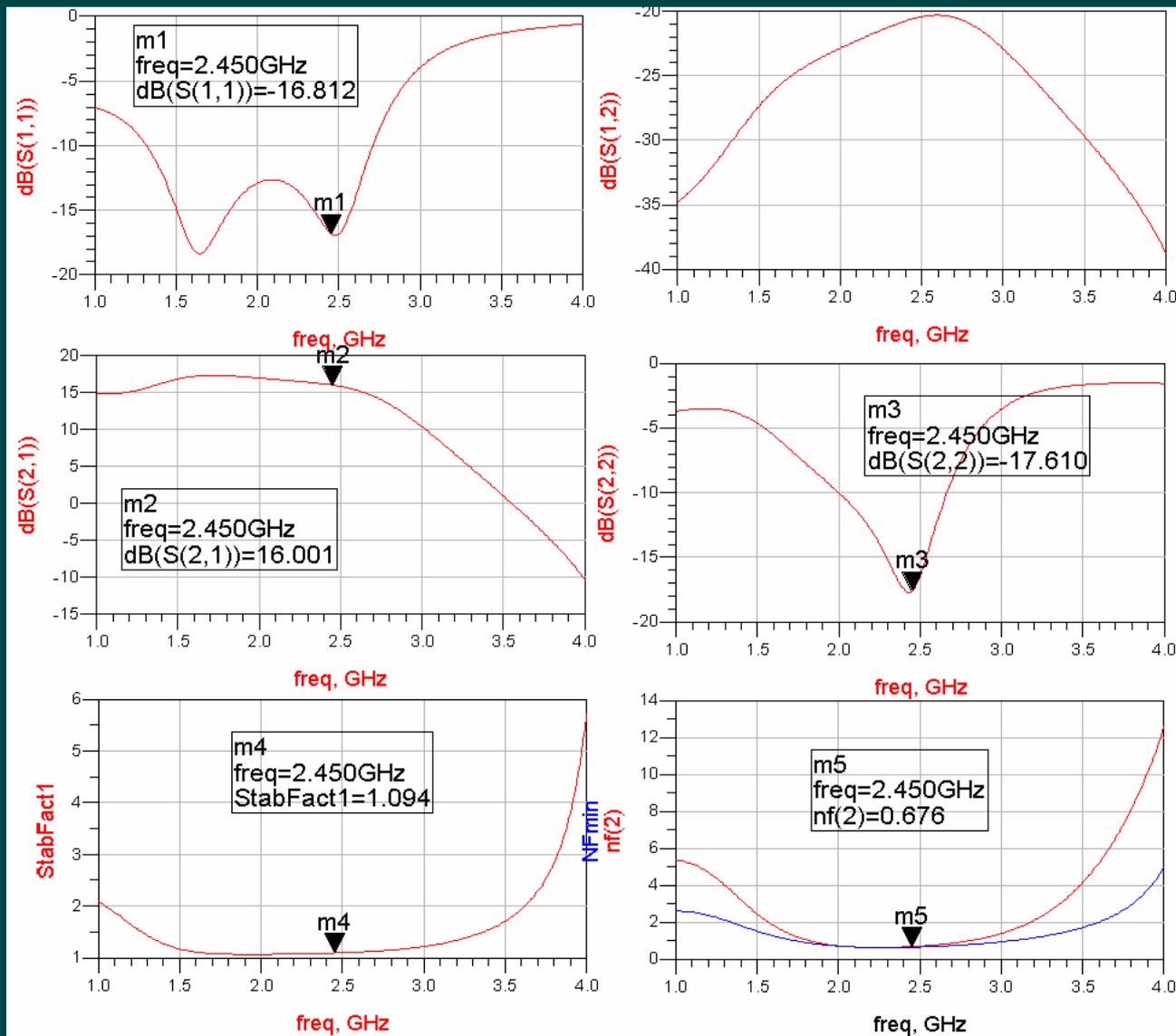
(将理想的传输线模型以实际的微带线模型替换, 50  $\Omega$  FR4微带线宽度为 1.4897 mm)

TL Tag	电长度 (deg)	物理长度 (mm)
TL3	25.7	4.8
TL4	51.7	9.7
TL5	44.1	8.2
TL6	90.8	17.0



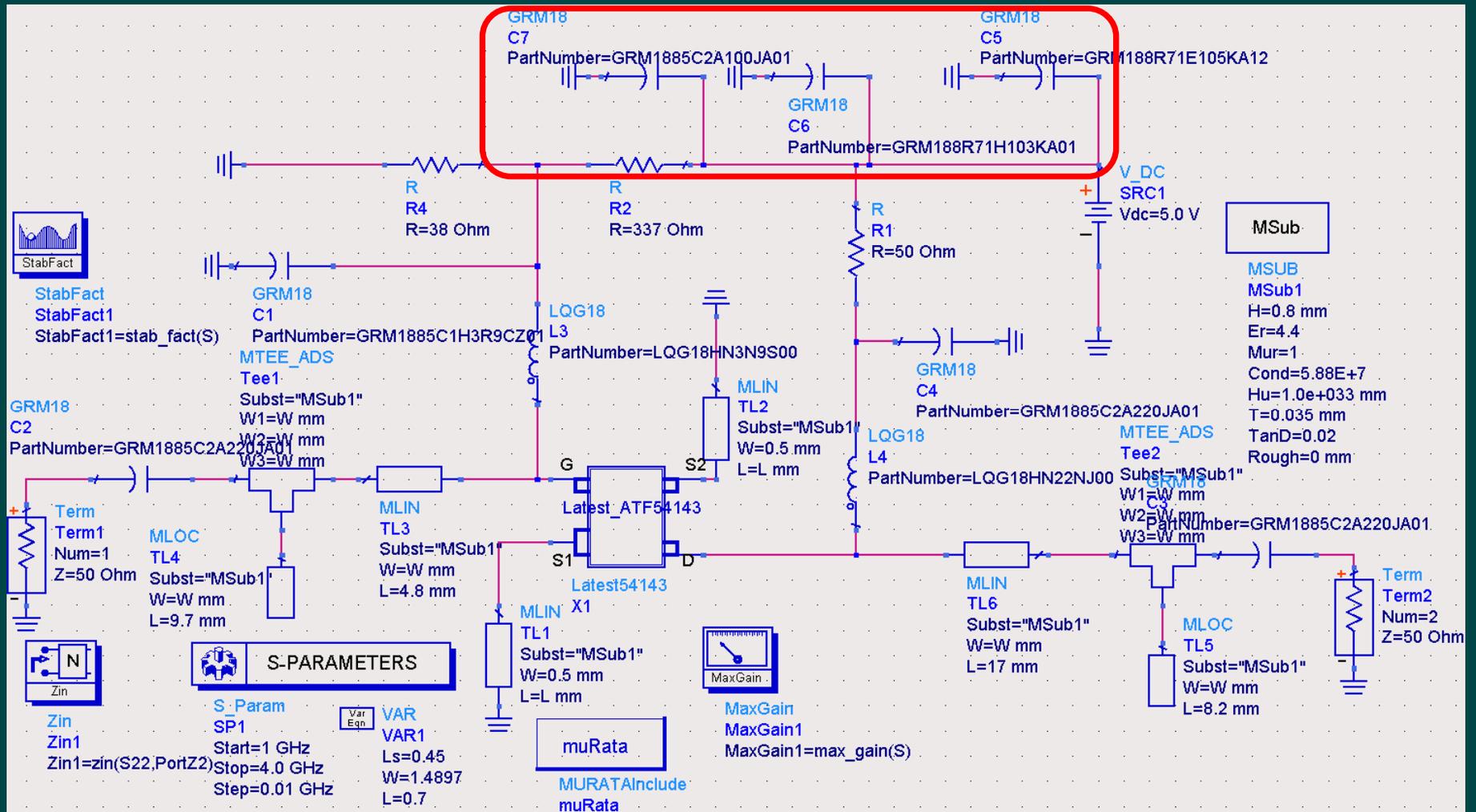
## V. 最大增益的输出匹配-3

(将理想的传输线模型以实际的微带线模型替换,  $50\ \Omega$  FR4微带线宽度为  $1.4897\ \text{mm}$ )



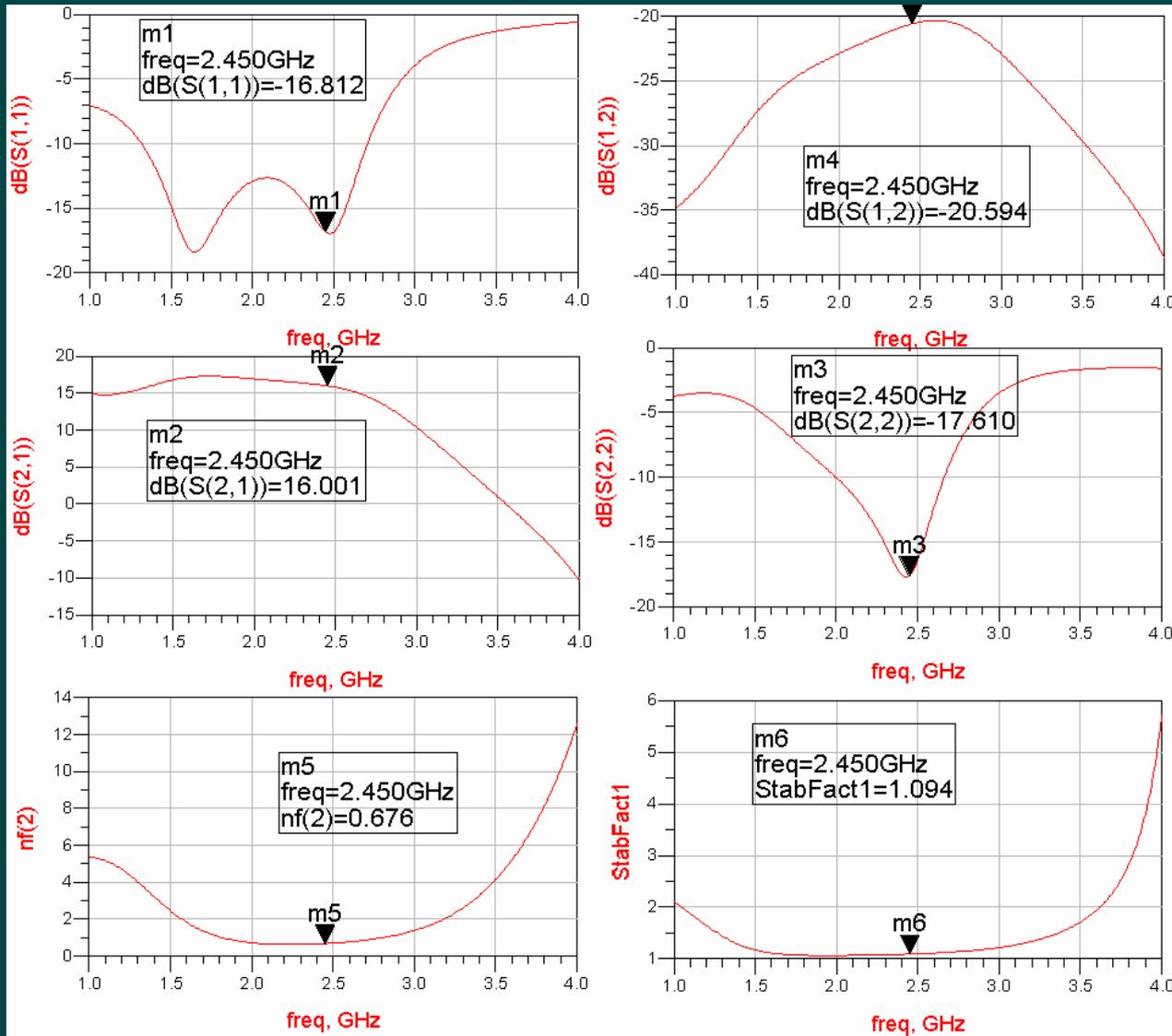
# V. 最大增益的输出匹配-4

(在实际的电路中，通过添加分立电容进一步对直流电源去耦)



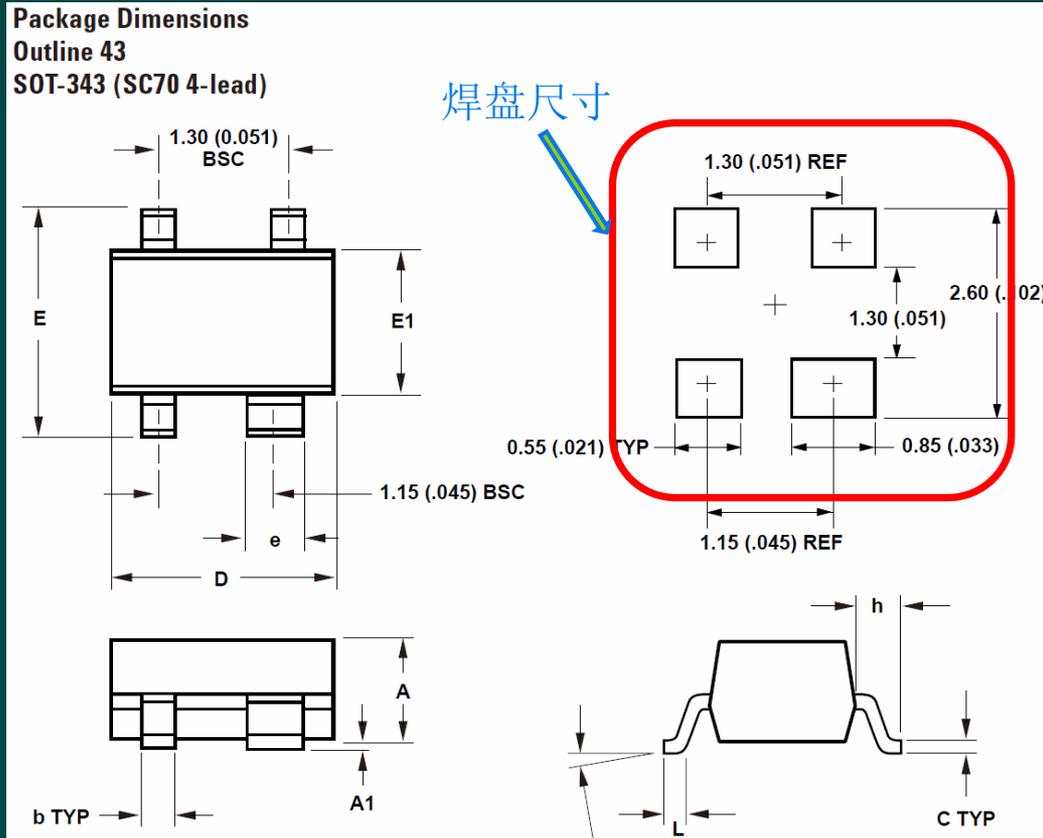
## V. 最大增益的输出匹配-4

(在实际的电路中，通过添加分立电容进一步对直流电源去耦)



# VI. 电路图和版图的联合仿真-1

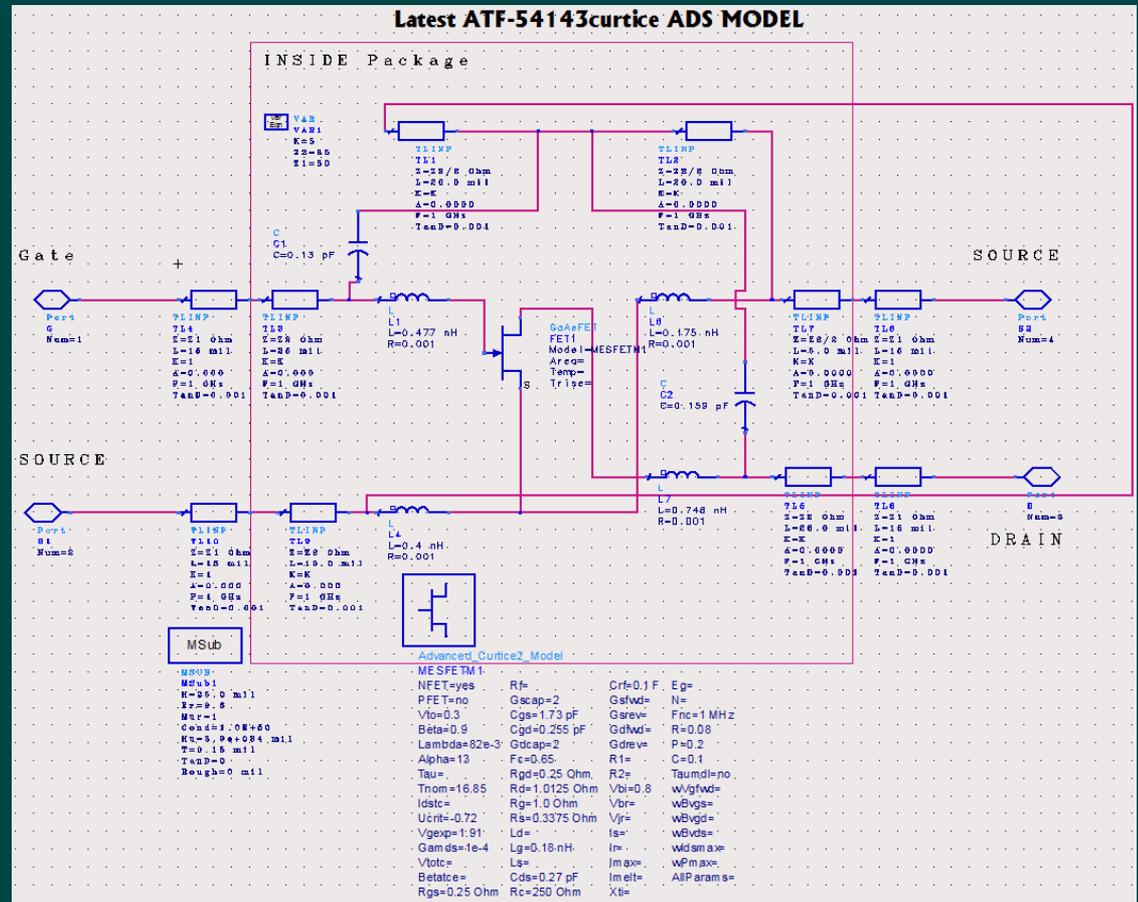
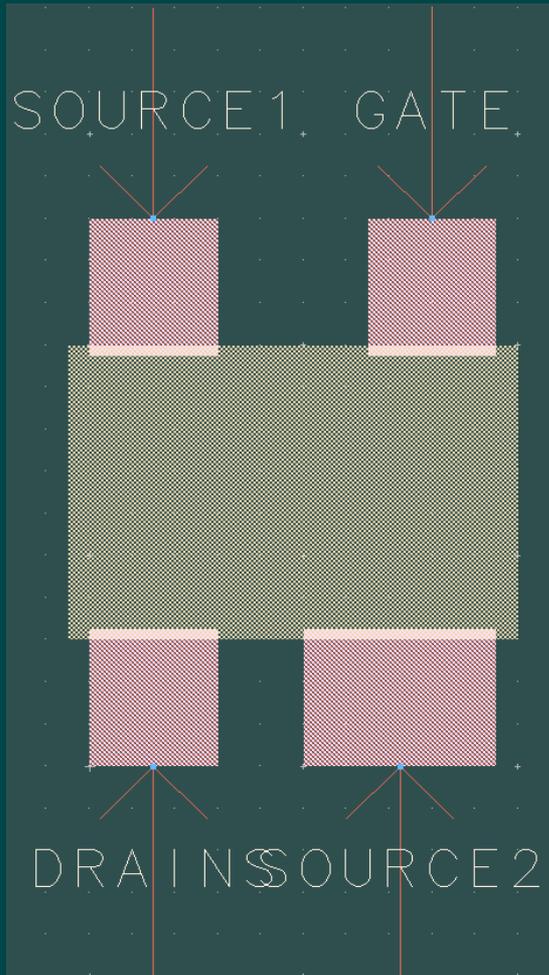
(根据ATF54143的Datasheet作出实际的封装图)



SYMBOL	DIMENSIONS	
	MIN.	MAX.
A	0.80 (0.031)	1.00 (0.039)
A1	0 (0)	0.10 (0.004)
b	0.25 (0.010)	0.35 (0.014)
C	0.10 (0.004)	0.20 (0.008)
D	1.90 (0.075)	2.10 (0.083)
E	2.00 (0.079)	2.20 (0.087)
e	0.55 (0.022)	0.65 (0.025)
h	0.450 TYP (0.018)	
E1	1.15 (0.045)	1.35 (0.053)
L	0.10 (0.004)	0.35 (0.014)
θ	0	10

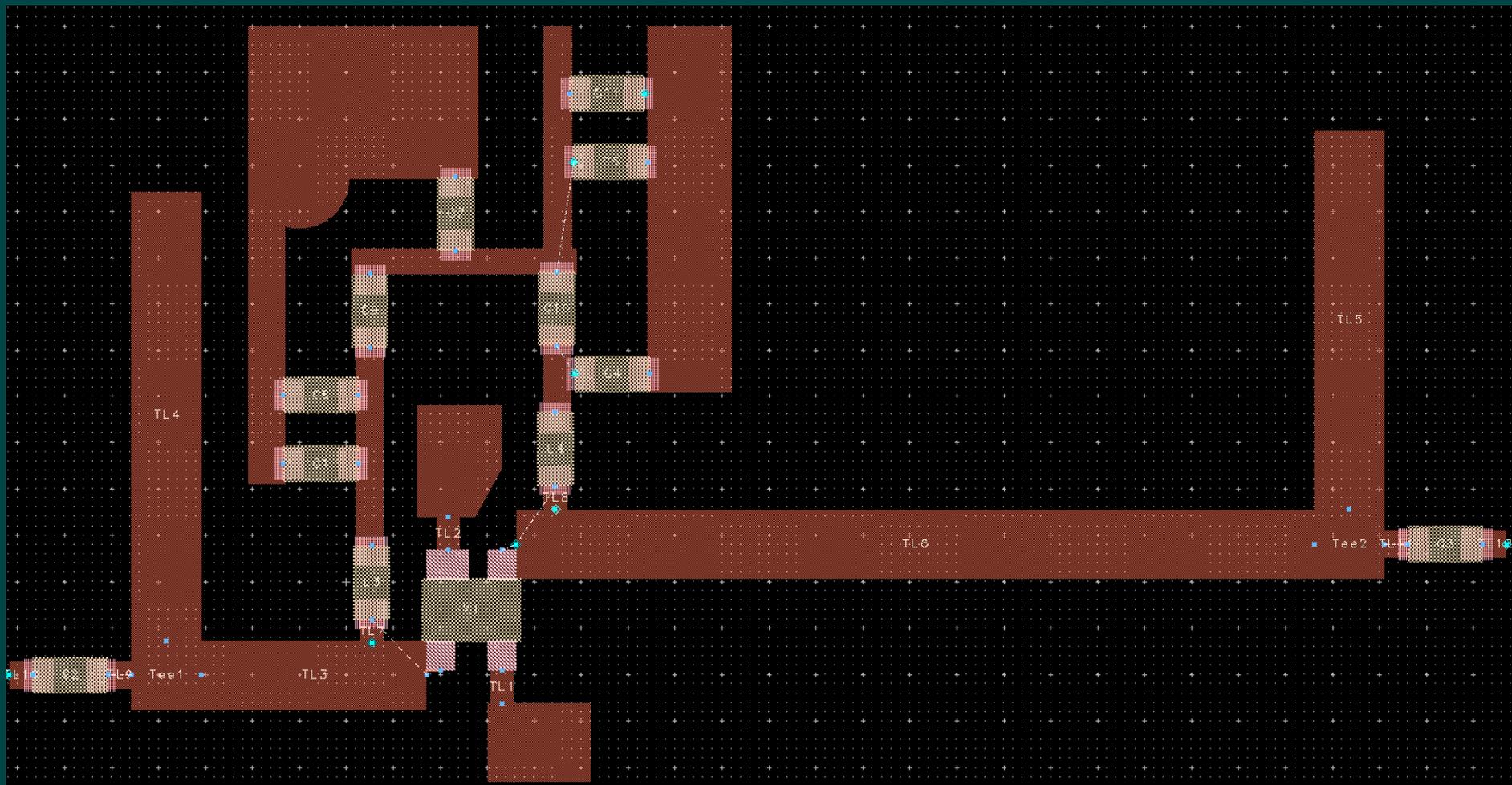
# VI. 电路图和版图的联合仿真-2

(根据ATF54143的Datasheet作出实际的封装图, 注意封装的端口号应与原理图相对应)



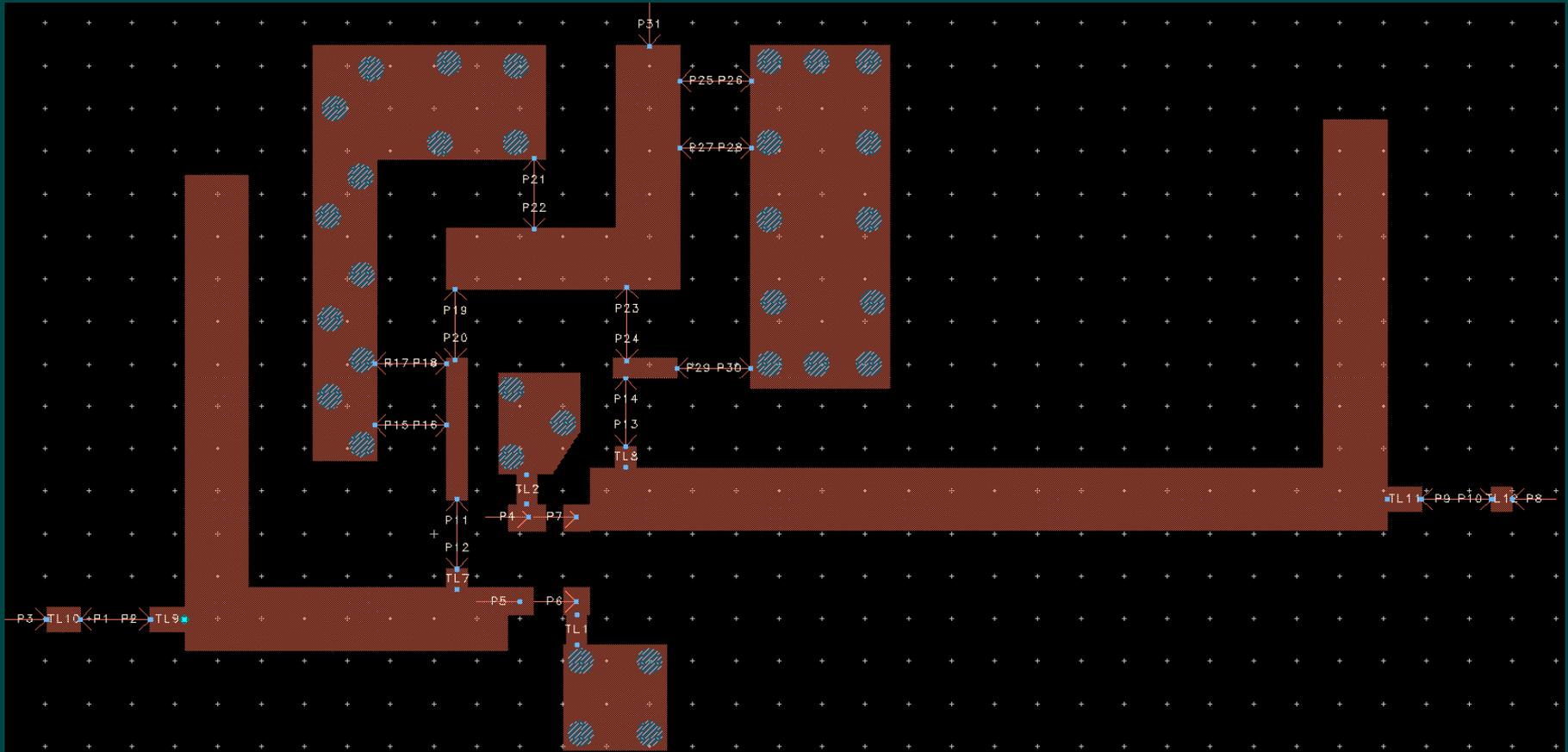
## VI. 电路图和版图的联合仿真-3

(从原理图同步到版图设计, 调整元器件封装的位置)



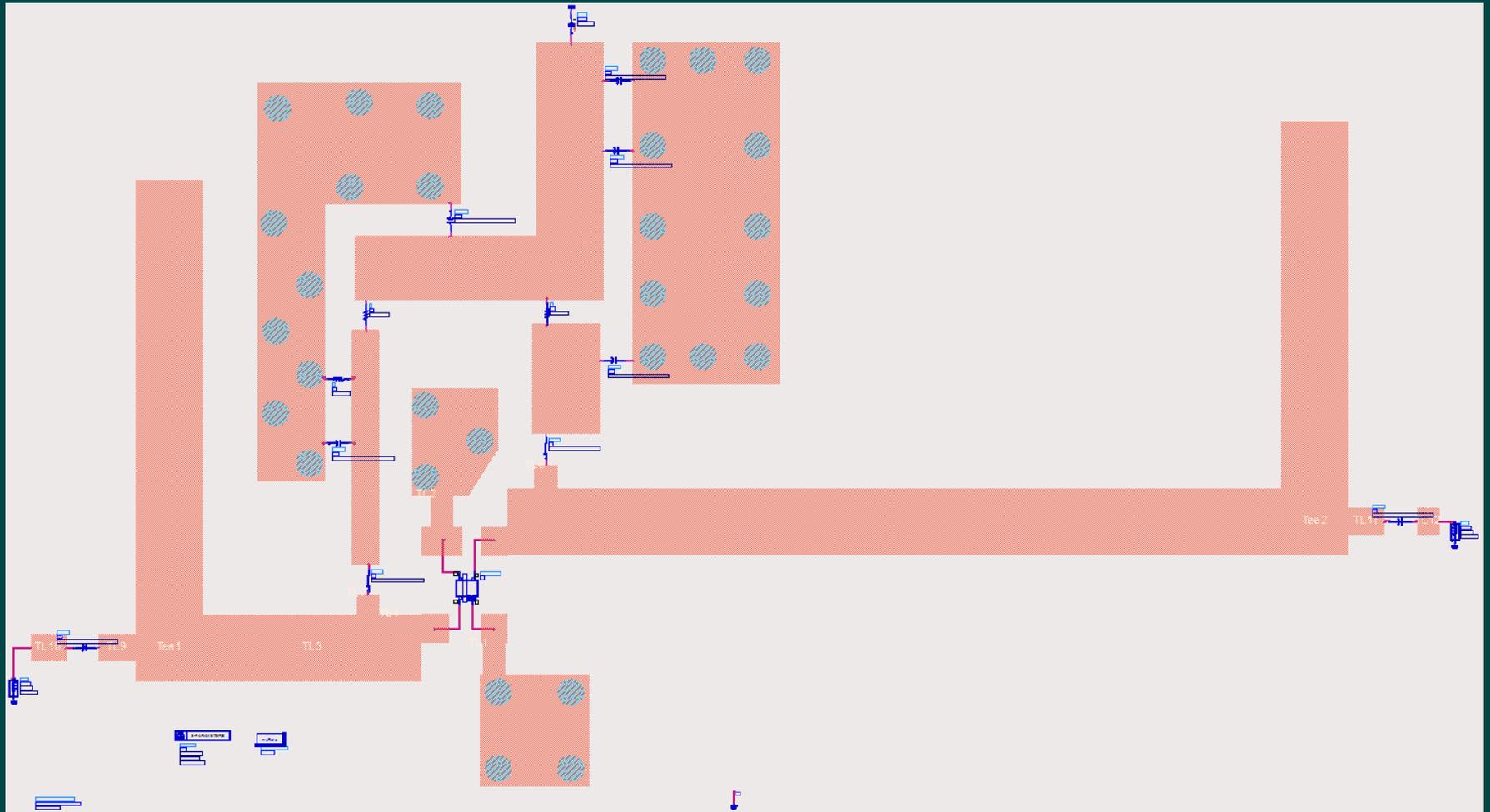
## VI. 电路图和版图的联合仿真-4

(从原理图同步到版图设计, 删除元器件的封装, 并在原封装相应位置添加协同仿真的桥梁internal port)



## VI. 电路图和版图的联合仿真-5

(从版图中生成元件component, 以供原理图设计调用)



# VI. 电路图和版图的联合仿真-6

(初步的仿真结果)

