

麻省理工学院
电气工程与计算机科学系
6.776
高速通信电路
2005 年春
Cadence 和 SpectreRF 教程
Albert Jerng
02/13/05

引言

本教程将介绍使用 Cadence 和 SpectreRF 在 6.776 课程里对电路进行仿真。Cadence 包含了 IC 设计的整个设计流程的所有工具，包括电路原理图、版图、电路仿真和验证工具。我们将在麻省理工学院的 SUN 服务器上运行 Cadence 4.4.6 版本。Spectre 电路仿真器需要在 Cadence 的设计框架中的 Affirma 模拟设计环境下运行。Spectre 是一种先进的 SPICE 仿真器，它可以在差分方程级进行模拟和数字电路的仿真。SpectreRF 还包括一些附加的仿真功能，如周期稳态（PSS）分析，S 参数分析及非线性噪声分析，这些分析将使射频电路的仿真更加容易。本教程将首先介绍如何在美国麻省理工学院服务器上获得 6.776 课程的 Cadence 运行环境。然后，给出两个例子帮助你熟悉 SpectreRF 电路仿真器。

运行 Cadence

1 登录到麻省理工学院的 SUN 服务器

2 键入以下命令行：

```
add 6.776
```

```
source /mit/6.776/setup_cadence
```

你可以添加这些命令行到你的 .cshrc.mine 文件，这样你就不必每次重复这一步。如果发生改变，你必须键入 source .cshrc.mine。

3 首次运行 Cadence 时，remove 或 move 你的 \sim /cds 目录，然后键入：

```
Cadence
```

Cadence 446 就可以启动了，并且会创建一个包含 6.776 所需文件的目录 \sim /cds。

这时，你应该会看到 icfb 和 Library Manager 这两个视窗，在 Library Manager，你会看到以下的之前下载的文件夹：

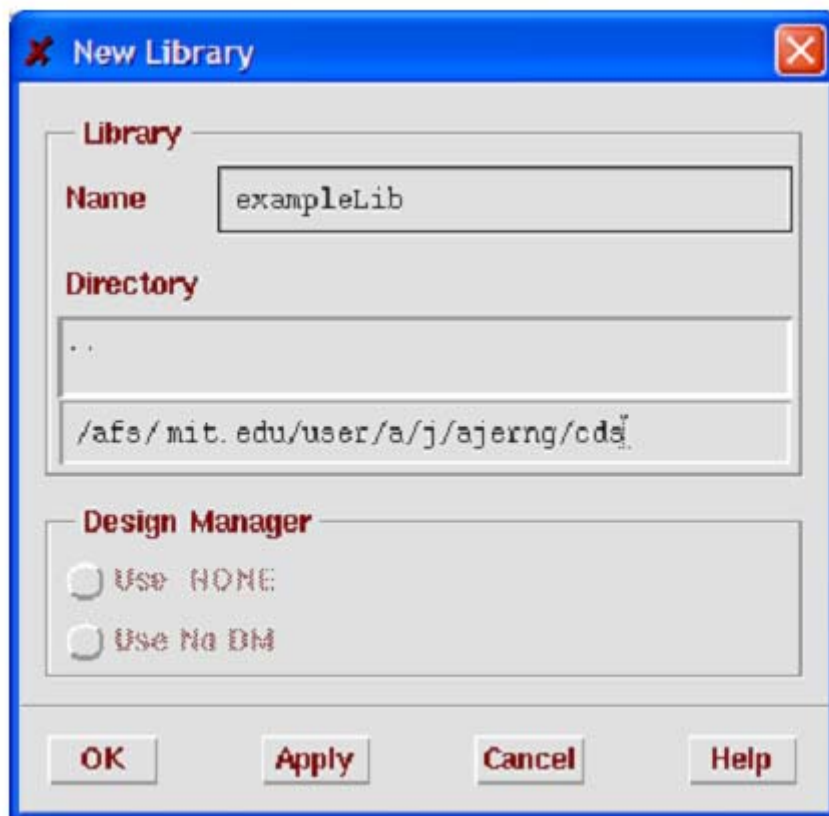
```
6776_Examples , 6776_Primitives , analogLib , basic
```

6776_Primitives 包含我们这节课将会用到的 NMOS 和 PMOS 晶体管 symbols。他们的最小沟道长度为 0.18 微米。 6776_Examples 包含了在本教程会出现的两个电路例子。范例 1 包含一个窄带射频放大器，范例 2 包含了一个高频振荡电路。analogLib 和 basic 包含许多有用的电路仿真器件，包括理想电压源和电流源，理想电阻、电容和电感。

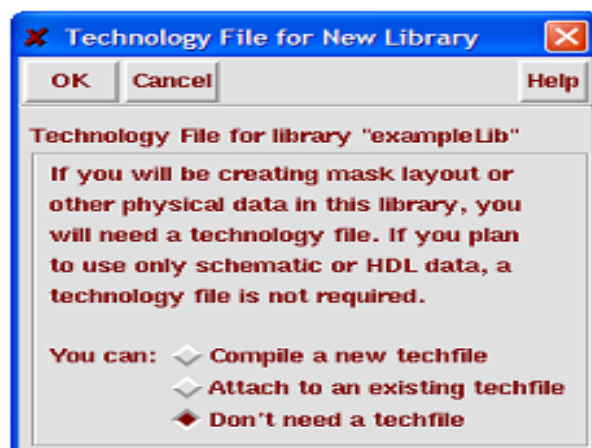
创建 schematic, symbol 和 Test-bench

第一步是创建一个包含新的 schematic 和 symbol 的 library。

- 1 在 Library Manage 窗口中，左键单击 File -> New -> Library
- 2 键入一个新的 Library 名称，比如 exampleLib，然后左键单击 OK

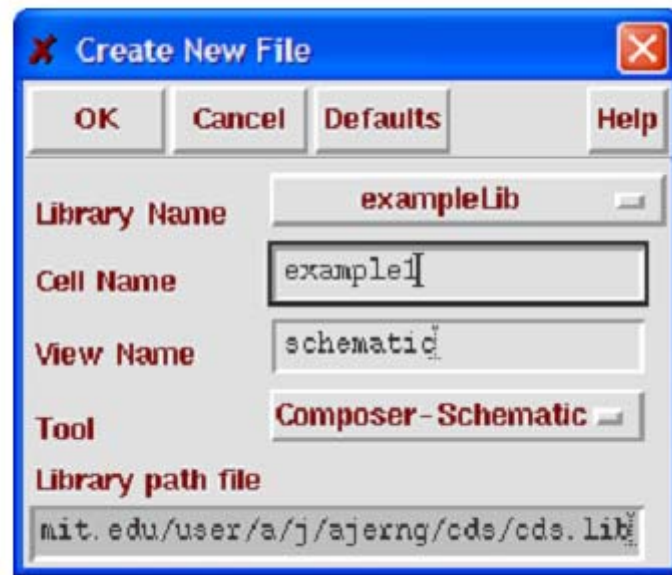


3. 在弹出的窗口中，左键单击 Don't need a techfile 然后左键单击 OK



你现在应该可以看到新创建的 library 的名称出现在 Library Manager 窗口的 libraries 列表之中。创建一个新 schematic:

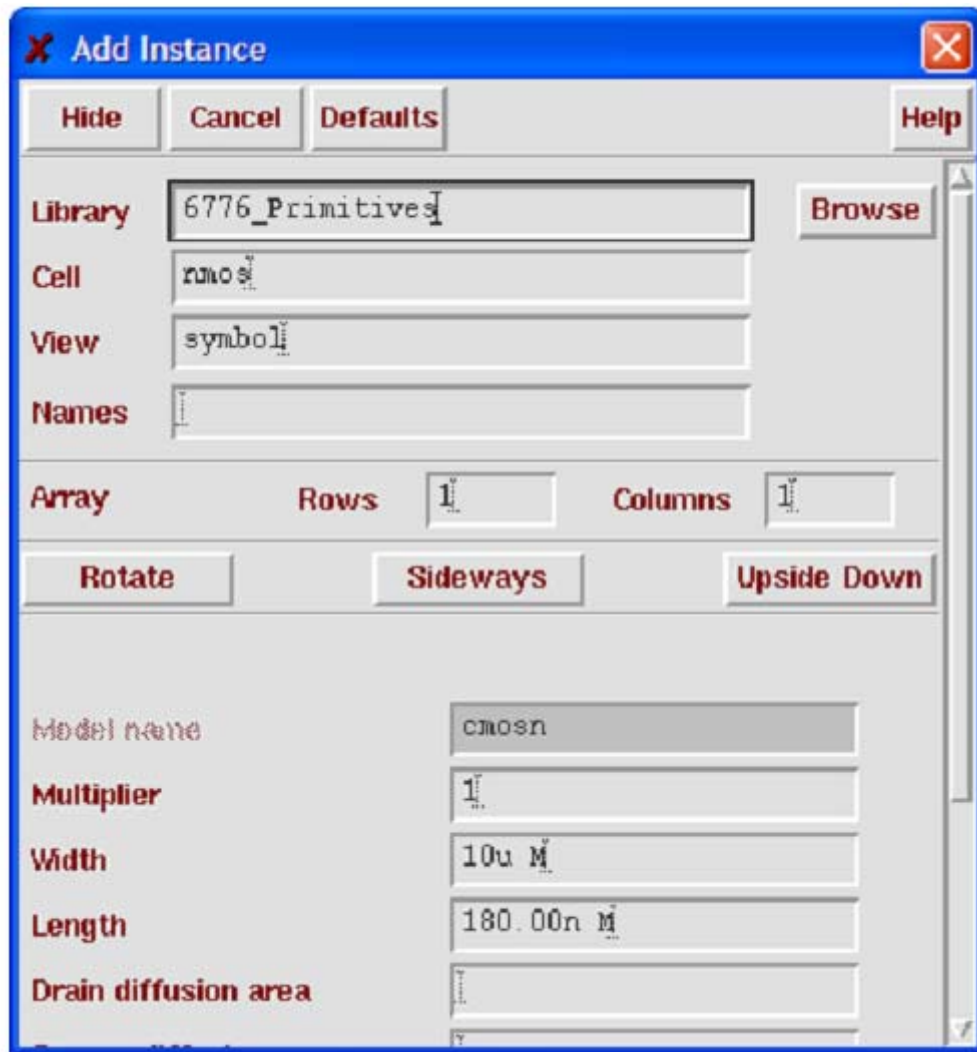
1. 左键单击你的 library 名称
2. 在 Cell 标题键入 schematic 的名称, 即例如 example1
3. 在 View 标题键入 schematic 然后按回车
4. 这时会出现一个名为 Create New File 的窗口, 确认信息后左键单击 OK



接着会弹出一个空白的电路原理图窗口。点击一下 pull-down 菜单来熟悉电路原理图的环境。请注意, 许多命令有快捷键。你将使用的绘制电路图的主要命令有 Add-> Instance 和 Add -> Wire(narrow)。运用快捷键, 你可以简单的分别键入 i 和 w 来激活这些命令。当添加一根连线时, 左键点击一次, 可以开始、停止和改变布线的方向, 双击鼠标左键将结束这根线。右键点击可以调整布线的单元类型(正交、直角等)。

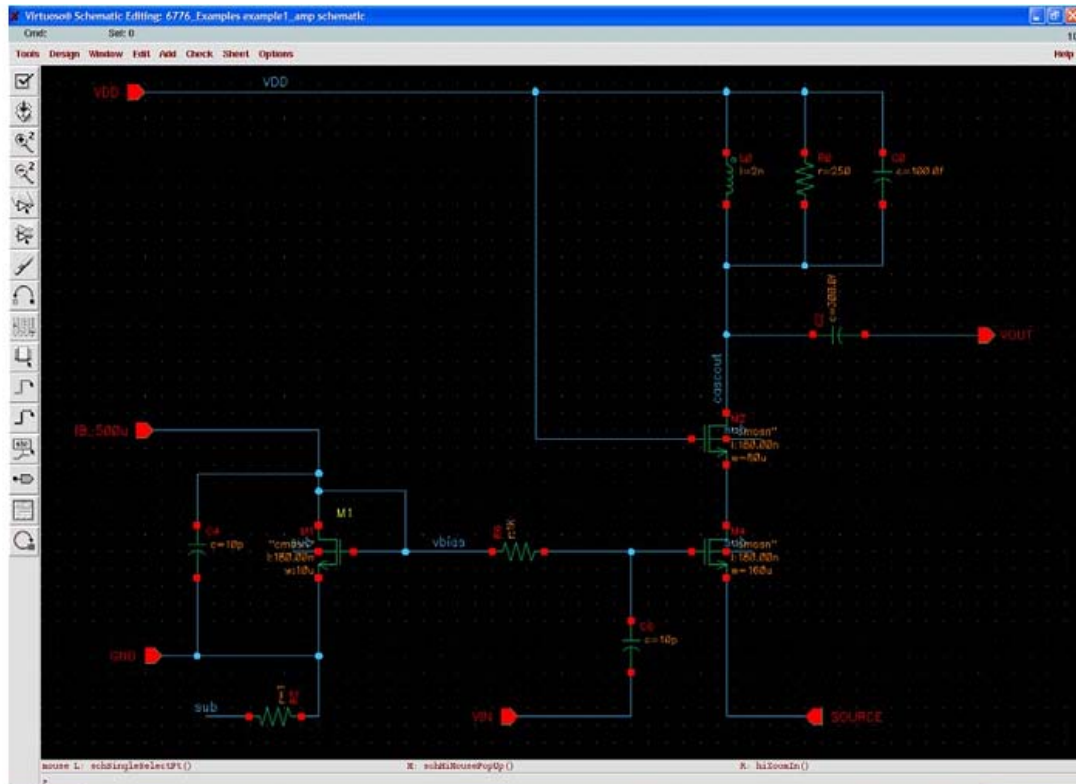
运用 Add -> Instance 弹出一个新窗口, 允许我们选择以前做好的 symbol, 为了从 6776_Primitives library 中添加一个 NMOS 晶体管:

1. 键入 i
2. 点击 Browse, library 选择 6776_Primitives, Cell 和 View 分别选择 nmos 和 symbol.



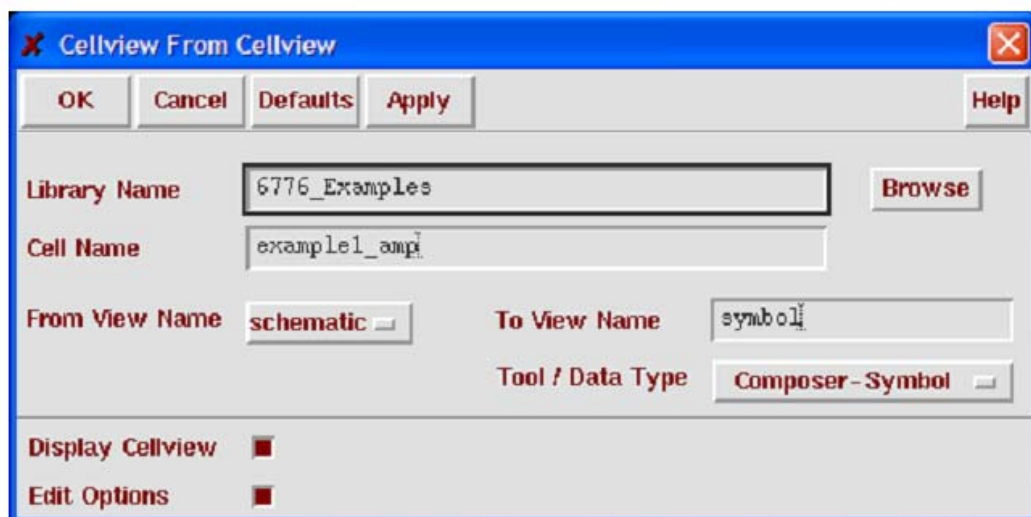
3. 输入想要的晶体管宽度和长度的尺寸。这些单元的单位是米，记得必须键入 u 和 n 表示微米和纳米。
4. 把晶体管的 symbol 放入到 schematic 窗口。你可以连续添加晶体管实例或者在这个窗口中添加不同的实例，点击 ESC 键就可以退出添加。
5. 要保存任何工作，左键单击 Design -> Check and Save。此命令将检查你的 schematic 是否有错误或者是警告，并保存 schematic。

创建一个如下面截图所示的 schematic 图,nmos 晶体管在 6776_Primitives library 中选取,理想电阻、电容和电感选用 analogLib 中的(res,cap,ind).这个 schematic 也可以在 6776_Primitives library 中找到。它的名字是 example1_amp。线路节点可以用左键单击 Add -> Wire Name 来标定,或者使用快捷键 l 来标定。Pins 定义了 schematic 的输入和输出。他们可以用 Add -> Pin 或者键入 P 来添加。



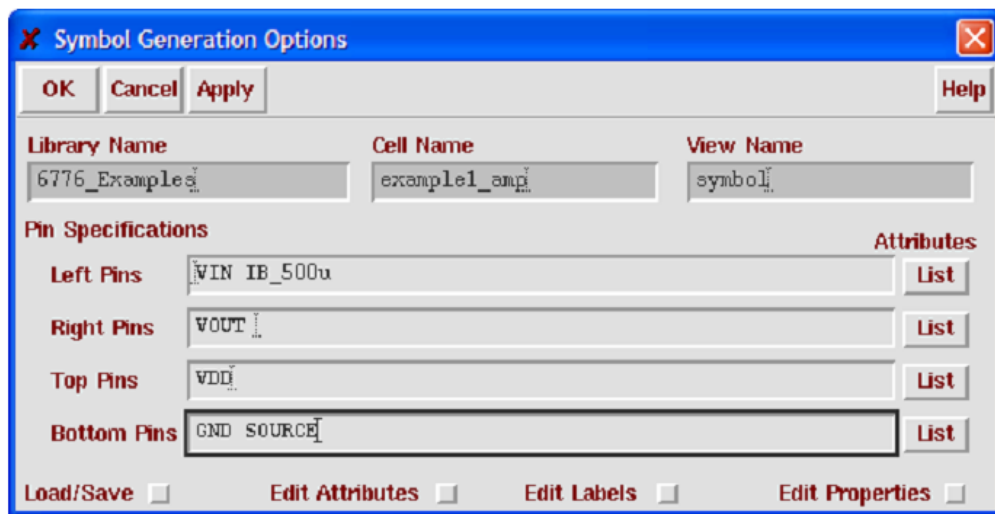
现在，我们可以为这个 schematic 创建一个 symbol，它可以作为一个实例添加到另一个独立的测试电路图中。为了从电路图窗口中创建这个 symbol：

1. 单击 Design -> Create Cellview -> From Cellview



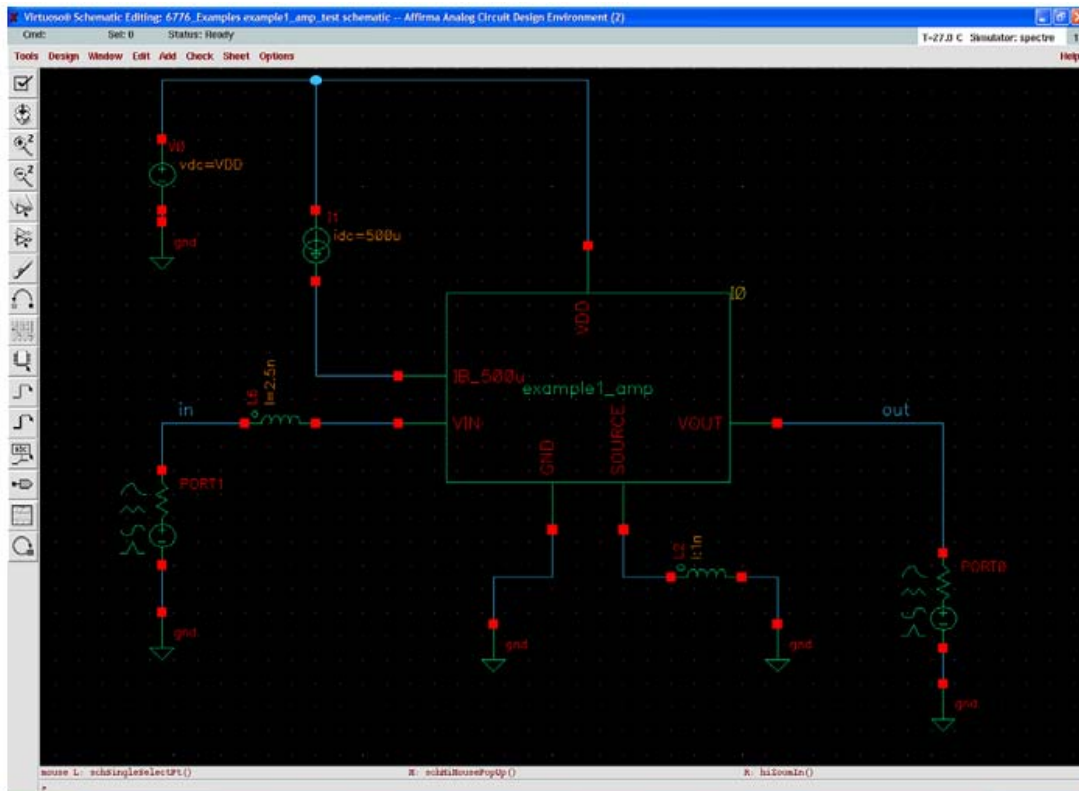
2. 确保在 To View Name 栏中键入 symbol。

3. 引脚可放置在所产生的 symbol 左, 右, 底部以及顶部。 为了在测试图中的方便应用, 需要合理地排列各个引脚, 然后单击 OK。



4. 这时会出现生成的 symbol。你可以按照你的需要编辑 symbol 图。当你完成后, 单击 Design -> Check and Save , 然后单击 Window -> Close

现在我们将为 example1_amp 中的窄带放大器仿真创建一个测试原理图。在同一个 library 中创建一个新的原理图, 在这个原理图中, 添加你刚创建的实例的 symbol。现在, 照着下一页的截图所示把测试原理图的线接好。一个有用的命令可以使你进入 example1_amp 的 symbol 和 schematic 中去编辑: Design -> Hierarchy -> Descend Edit。这个命令的快捷键是 E。键入 CTRL - E 将会退回上一级。输入和输出电压源有 50 欧姆的电源电阻。他们的名字叫 ports, 是专业电源, 可以在 analogLib library 中找到它们。



在此原理图中，我们使用理想电压源和电流源为放大器提供直流偏置。VDC 是 analogLib 中的一个理想电压源。IDC 是 analogLib 中的一个理想电流源。我们把放大器 symbol 的 GND 引脚连接到理想接地元件，这个接地元件也在 analogLib 中。为了得到精确的 RF 放大器增益模型，我们把 1nH 的理想电感连接在放大器的 SOURCE 管脚和地之间。这是一个集成 RF 放大器典型的键合线电感模型。输入引脚 VIN 通过一个 2.5 纳亨的电感连接到输入源。这电感是用来匹配放大器输入电阻和 50 欧姆电源电阻的。物理上可以通过键合线电感和分离电感或局部电感的组合来实现。

输入端口的特性按照下图填写：

Property	Value	Display
Library Name	analogLib	off
Cell Name	port	off
View Name	symbol	off
Instance Name	PORT1	off

User Property	Master Value	Local Value	Display
Ignore	TRUE		off

CDF Parameter	Value	Display
Resistance	50 ohm	off
Port number	1	off
DC voltage		off
Source type	Sine	off
Frequency name 1	First	off
Frequency 1	50 Hz	off
Amplitude 1 (Vpk)		off
Amplitude 1 (dBm)	Pin	off
Phase for Sinusoid 1		off
Sine DC level		off
Delay time		off
Display second sinusoid	<input checked="" type="checkbox"/>	off
Frequency name 2	Second	off
Frequency 2	5.10 Hz	off
Amplitude 2 (Vpk)		off
Amplitude 2 (dBm)	Pin	off
Phase for Sinusoid 2		off
Display modulation params	<input type="checkbox"/>	off
Display small signal params	<input checked="" type="checkbox"/>	off
PAC Magnitude		off
PAC Magnitude (dBm)		off
PAC phase		off
AC Magnitude	1 V	off
AC phase		off

输入 port 的电阻为 50 欧姆，它作为一个能够输出双音信号的正弦源。第一个频率名称为“First”，频率为 5GHz，幅度为 Pin dBm。Pin 是代表功率的变量，单位为 dBm，我们稍后会定义它。第二个频率的名称为“Second”，它与“First”幅度相同，但它的频率是 5.1GHz。该 port 也被用做交流振幅为 1 的小信号源。

输出端口的特性按照下图填写：

Edit Object Properties

OK Cancel Apply Defaults Previous Next Help

Apply To:

Show: ☐ system ☒ user ☒ CDF

Property	Value	Display
Library Name	analogLib	<input type="button" value="off"/>
Cell Name	port	<input type="button" value="off"/>
View Name	symbol	<input type="button" value="off"/>
Instance Name	PORT0	<input type="button" value="off"/>

User Property	Master Value	Local Value	Display
Ignore	TRUE		<input type="button" value="off"/>

CDF Parameter	Value	Display
Resistance	50 Ohms	<input type="button" value="off"/>
Port number	2	<input type="button" value="off"/>
DC voltage		<input type="button" value="off"/>
Source type	sine	<input type="button" value="off"/>
Frequency name 1		<input type="button" value="off"/>
Frequency 1		<input type="button" value="off"/>
Amplitude 1 (Vpk)		<input type="button" value="off"/>
Amplitude 1 (dBm)		<input type="button" value="off"/>
Phase for Sinusoid 1		<input type="button" value="off"/>
Sine DC level		<input type="button" value="off"/>
Delay time		<input type="button" value="off"/>
Display second sinusoid	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="off"/>
Display modulation params	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="off"/>
Display small signal params	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="off"/>
Display temperature params	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="off"/>
Display noise parameters	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="off"/>
Multiplier		<input type="button" value="off"/>

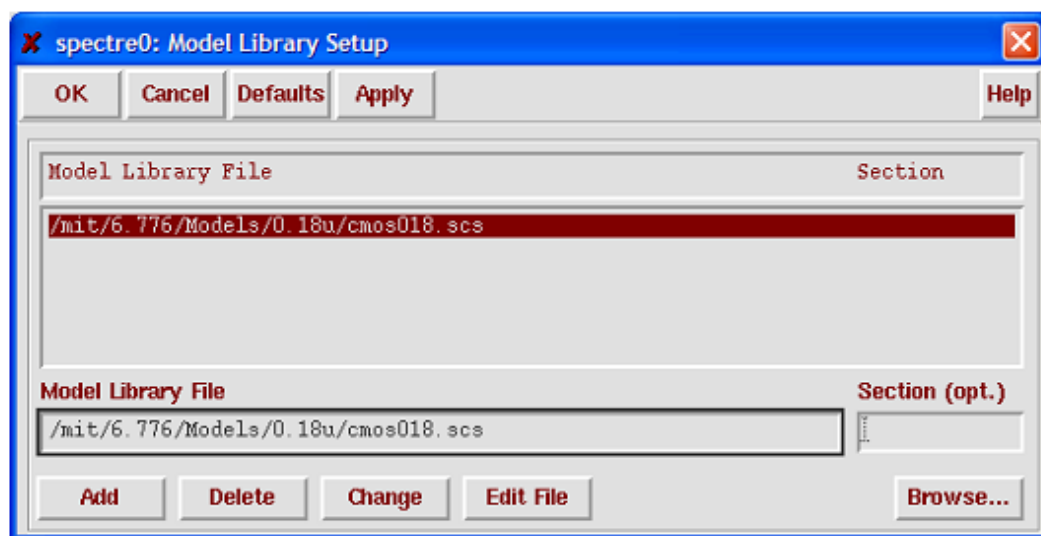
输出端口的编号是“2”，并且有 50 欧姆的电阻。此端口作为输出负载。这个端口不需要施加任何信号。

我们现在准备用 Spectre 仿真测试原理图。

应用 Affirma 仿真

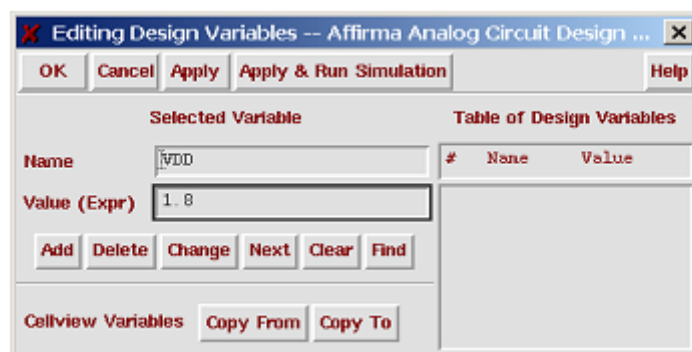
左键单击 schematic 视窗的 Tool -> Analog Environment 来调入 Affirma Analog Design Environmen。该窗口可以用来定义 analyses, variables, 和 outputs。为了给 6776_Primitives library 中的晶体管赋予到合适的模型，我们必须首先添加模型文件到 Affirma 的 Setup 菜单。

1. 左键单击 Setup -> Model Library
2. 在 Model Library File 中键入
/mit/6.776/Models/0.18u/cmos018.scs
3. 单击 Add, 然后单击 OK。



下一步定义我们所使用的原理图中的变量，VDD 和 Pin。

1. 左键单击 Variables -> Edit
2. 在 Name 框中，键入 VDD。
3. 在 Value 框中，键入 1.8。
4. 左键单击 Add



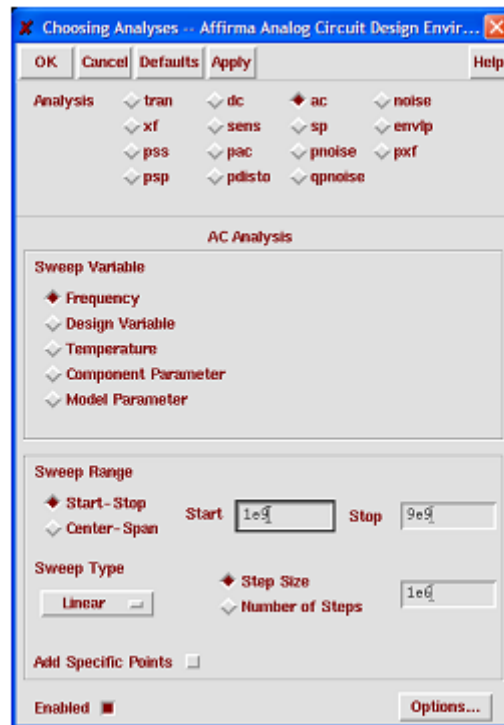
5. 重复添加 Pin, Value 框键入-20

我们现在定义 DC 和 AC analyses。

1. 左键单击 analyses -> Choose...

2. 左键单击 dc 并且左键单击框图中的 Save DC Operating Point 选项

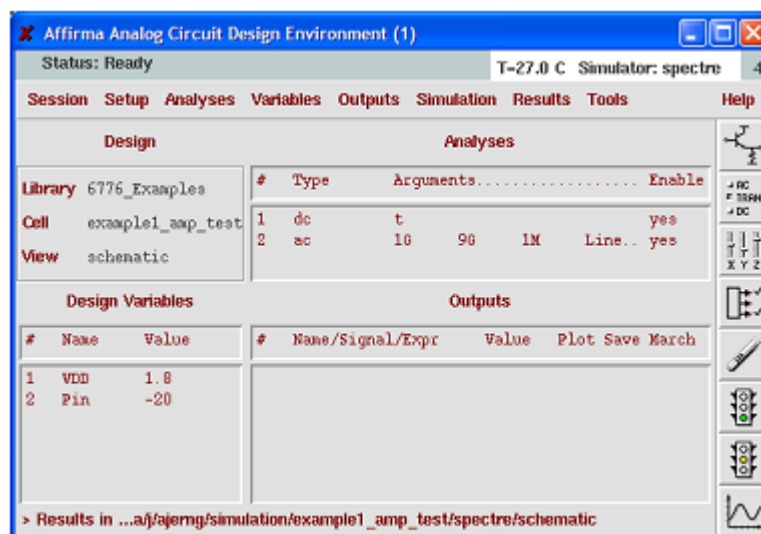
3. 左键单击 ac 并填写框如下



4. 左键单击 OK

交流分析将以步长为 1MHz 进行扫描, 频率从 1GHz 至 9 GHz。

Affirma 仿真窗口应如下所示。



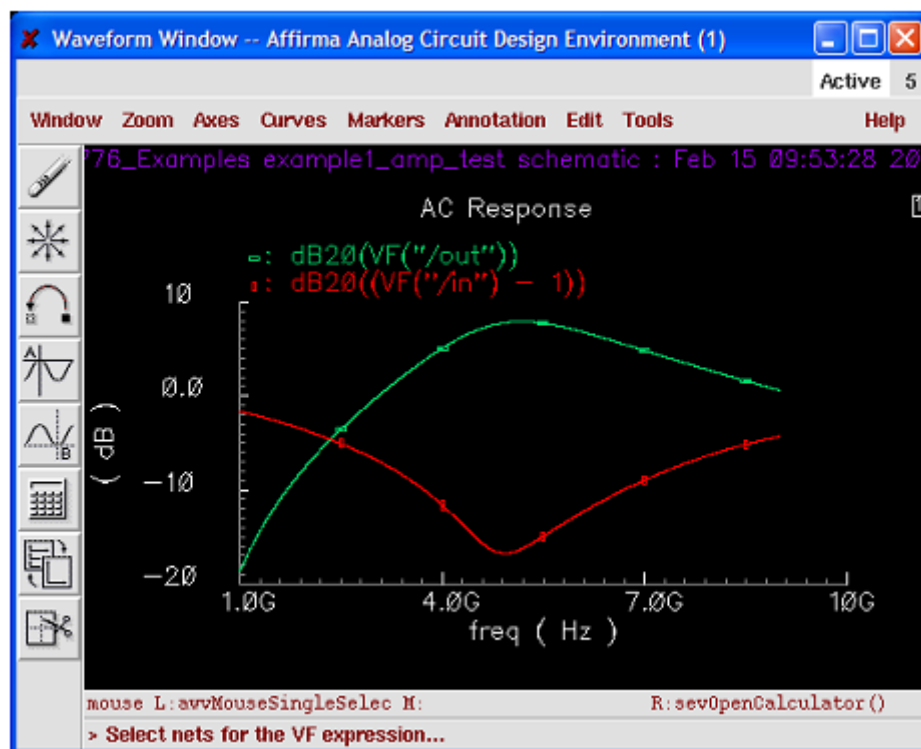
在仿真之前，我们可以左键单击 Session -> Save State, 并且填入一个状态名称来保存我们所定义的 variables 和 analyses 状态。以后我们运行 Affirma 重新打开原理图，用左键单击 Sessions -> Load State 来加载上次的设置。

进行仿真并得出仿真结果图-

1. 请确保你已经对电路图进行左键单击 Design -> Check and Save 的操作以保证对电路图任何修改的保存。
2. 然后，转到 Affirma 窗口，左键单击 Simulation -> Netlist and Run。
3. 你可以左键单击 Result -> Annotate -> DC Node Voltages or Results -> Annotate -> DC Operating Points 来分别观察结点电压或和器件工作点。
4. 左键单击 Result -> Direct Plot 可以对 AC 幅值、AC 相位和 AC dB20 这些 AC 参数进行作图。
5. 或者，你也可以左键单击 Tool -> Calculator ...这会产生一个计算器窗口，可以对你的电路原理图的结点进行各种数值计算来得到仿真结果图。

给以下表达式作图

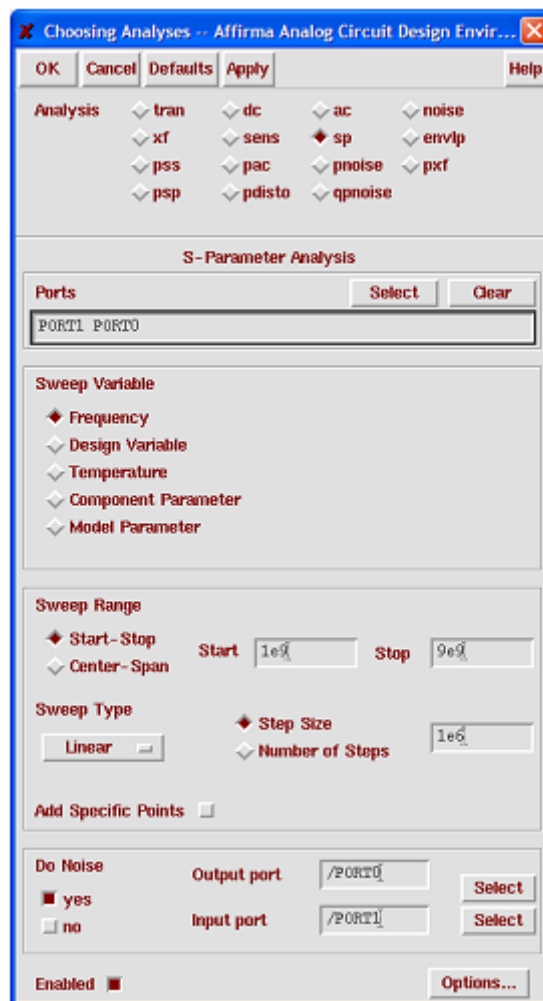
1. $\text{dB20}(\text{VF}("/\text{out}"))$
2. $\text{dB20}((\text{VF}("/\text{in}")) - 1)$



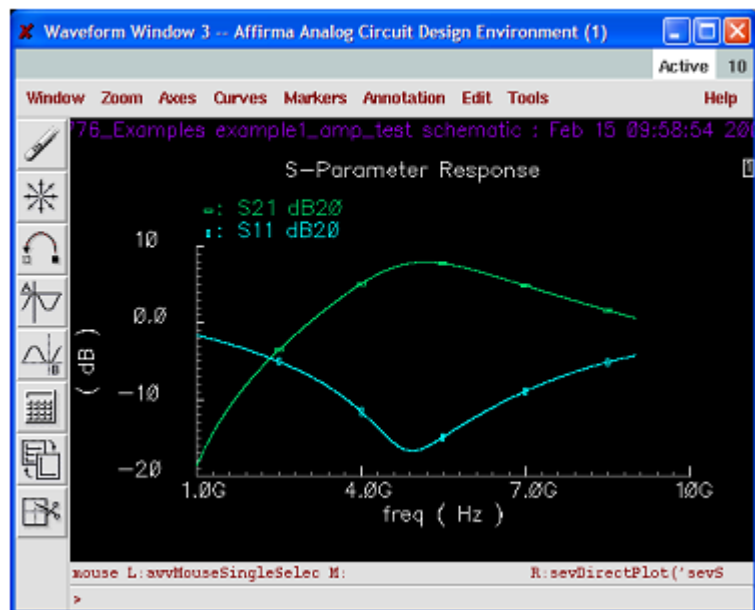
基于我们已经在课堂上学习的 s 参数，你应该能看到这两个数量分别代表放大器的 s21 和 s11。我们现在用相同的原理图进行几个其他的仿真。

S 参数仿真

1. 左键单击 Analyses -> Choose -> sp
2. 在 Ports 方框处，在原理图中选择输入和输出端口
3. Sweep Variable 选择 Frequency
4. 以步长为 1MHz，从 1GHz 到 9GHz 进行线性扫描
5. 在 Do Noise 下选择 yes，并且选择 output 和 input 端口
6. 左键单击 OK 来关闭 Analyses 窗口
7. 左键单击 Simulation -> Netlist and Run 进行仿真

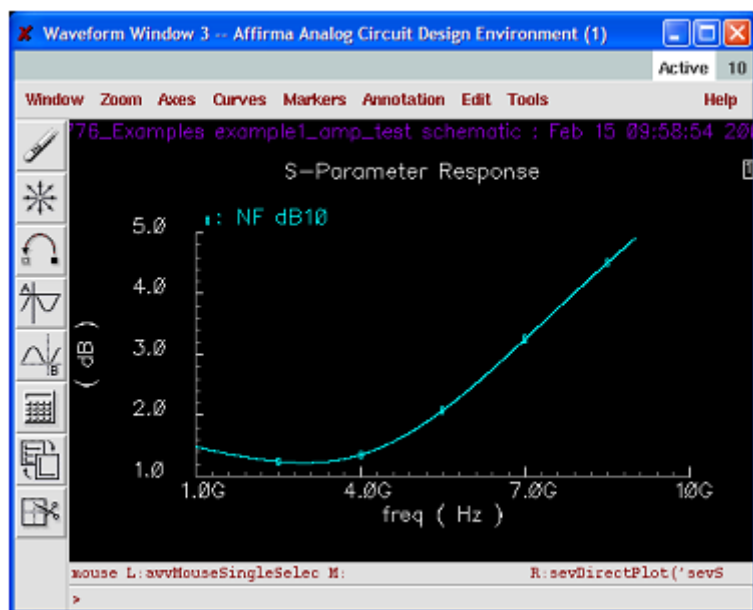


左键单击 Results -> Direct Plot -> S-Parameter ...
S 参数结果窗口做出了 S11 (dB20) 和 S21 (dB20) 的图。
与我们之前所做的 AC 分析进行结果比较如何？



你也可以使用相同的 S 参数结果窗口作出放大器 NF 的图。

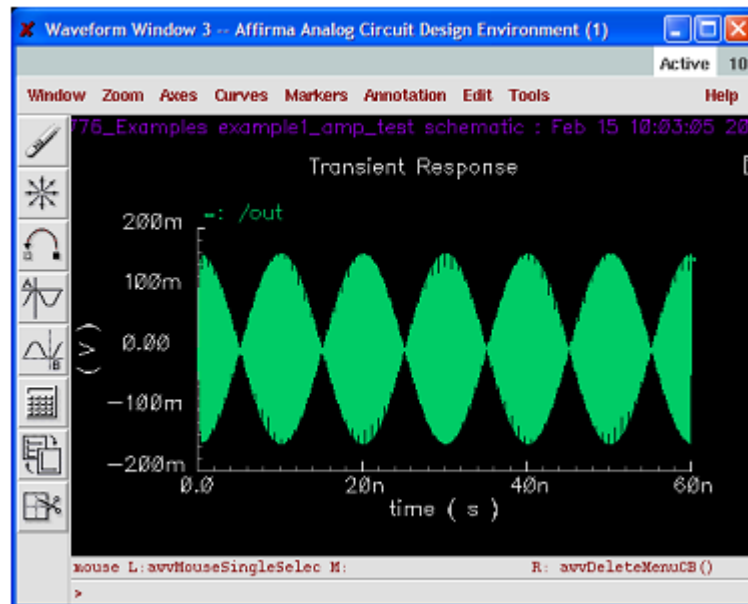
作出放大器 NF dB10 的图。你应该测量到噪声系数在 5 GHz 时小于 1.8dB。



瞬态仿真

1. 左键单击 Analyses -> Choose ... -> tran
2. stop time 设置为 60n, accuracy default 设置为 moderate
3. 左键单击 Options...
4. 在 Time Step Parameters 标题下, maxstep 设置为 5p, 这里通常的规则是: 步长应该为所感兴趣的频率的周期的 1/50. 在这个例子中, 5 GHz 波形的周期为 200ps。

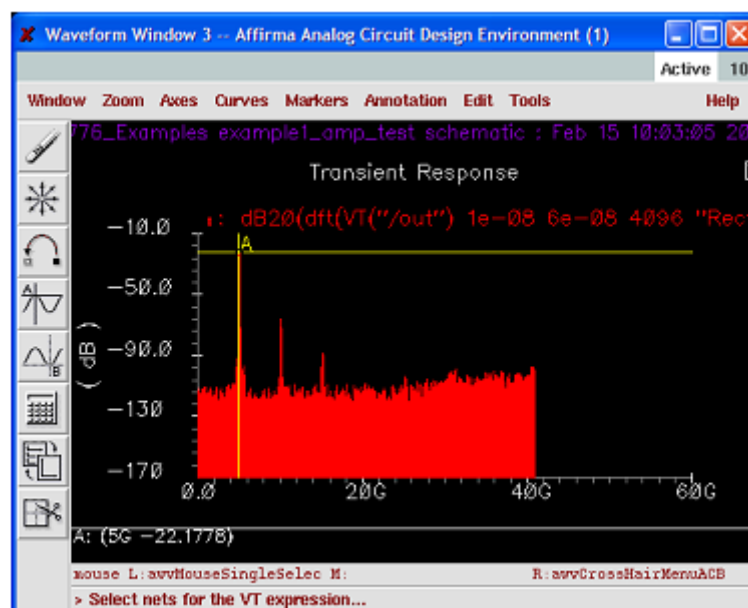
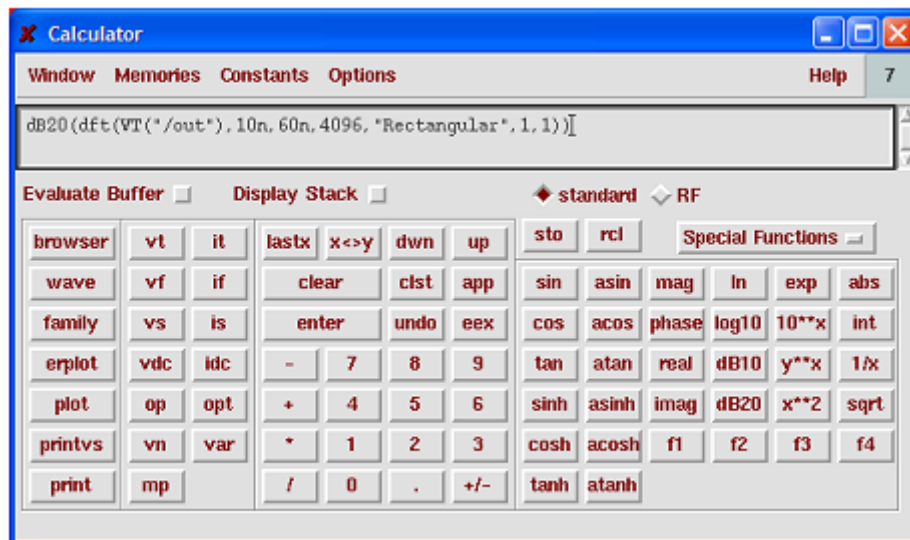
5. 在 Integration Method Parameters 标题下, method 设置为 gear2only。这种集成方式能使电路正确地收敛。
6. 左键单击 Simulation -> Netlist and Run 来仿真
7. 为了画出瞬态波形, 左键单击 Results -> Direct Plot -> Transient Signal, 从原理图中选择节点来观看他们的波形
8. 在输出结点画出瞬态波形



这波形包含了两个附加在 5 GHz 和 5.1 GHz 的正弦信号。
我们现在使用计算器绘制 FFT 的输出波形并且得到放大器的功率增益。

1. 左键单击 Tools -> Calculator
2. 左键单击 vt 并且选择原理图的输出节点
3. 在 Special Functions 方框下左键单击 dft...
4. 按下列参数填写 Discrete Fourier Transform 方框

5. 左键单击 OK，然后在计算器窗口中，左键单击 dB20 来得到 dB20 的整个数量。
6. 左键单击 erplot 清除现有的图并且画出 FFT 的图。
7. FFT 应当显示出，输出电压增益在 5GHz 下为 -22.18dBm。



以 50 欧姆归一化来计算的输出功率。假如输入功率为 -20 dBm，放大器的功率增益是多少？

周期稳态分析

1. 左键单击 Analyses -> Choose ... -> pss
2. 在 Fundamental Tones 列表下，点击 Update From Schematic
3. 从频率列表中，你应该能看到从原理图中得到的频率 1 和频率 2。

4. 选择 Beat Frequency 并且左键单击 Auto Calculate

5. beat frequency 的方框中应该显示 100 MHz

6. number of harmonics 中键入 60。这意味着，在 100 MHz 的 Beat Frequency 下，周期稳态分析 (pss) 将会收集 60 次谐波。也就是说，我们将得到 6 GHz 的信息。由于我们的主要基准是 5GHz，这些谐波就足够了。如果我们想得到的信息是输入 5GHz 频率时的 2 次或 3 次谐波，在 number of harmonics 中至少填入 150。

7. 在 Accuracy Defaults 下，点击 moderate，Additional Time for Stabilization 方框中键入 10n。

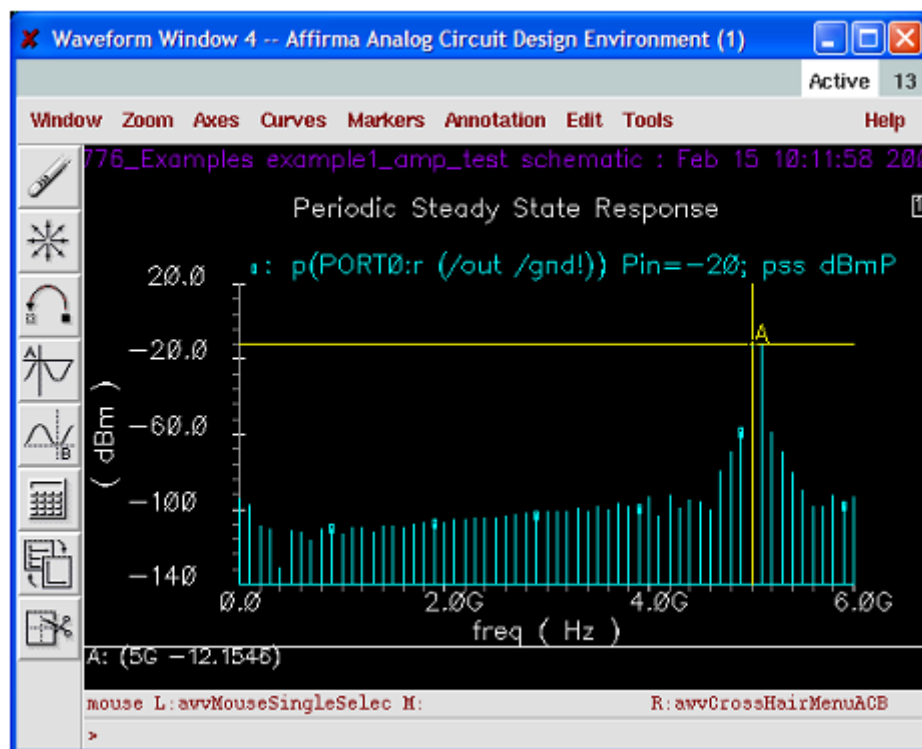
8. 左键单击 Sweep，以步长为 5 对 Pin 从 -30 到 0 进行扫描。



9. 左键单击 Ok 来关闭这个界面
10. 左键单击 Simulation -> Options -> Analog
11. 改变 reltol 至 $1e-4$ 。减小 reltol 将提高仿真器的准确性并减小底噪声，可以使我们得到单个谐波。但是它会增加仿真时间。
12. 左键单击 Simulation -> Netlist and Run 开始仿真。

为了对 pss 仿真结果做图，左键单击 Results -> Direct Plot -> PSS
首先，按照以下进行设置来得到输入功率为 -20dBm 时的功率增益：

1. Plot Mode -> Replace
2. Analysis -> pss
3. Function -> power
4. Select -> Port (fixed R(port))
5. Sweep -> spectrum
6. Modifier -> dBm
7. Variable Value (Pin) -> -20
8. 在原理图上选择输出端口并做图



在 5 GHz 时，你应该测量到输出功率为 -12.15 dBm。这相当于功率增益为 7.85 dB。这怎么和上一节瞬态分析得出的结果进行对比？

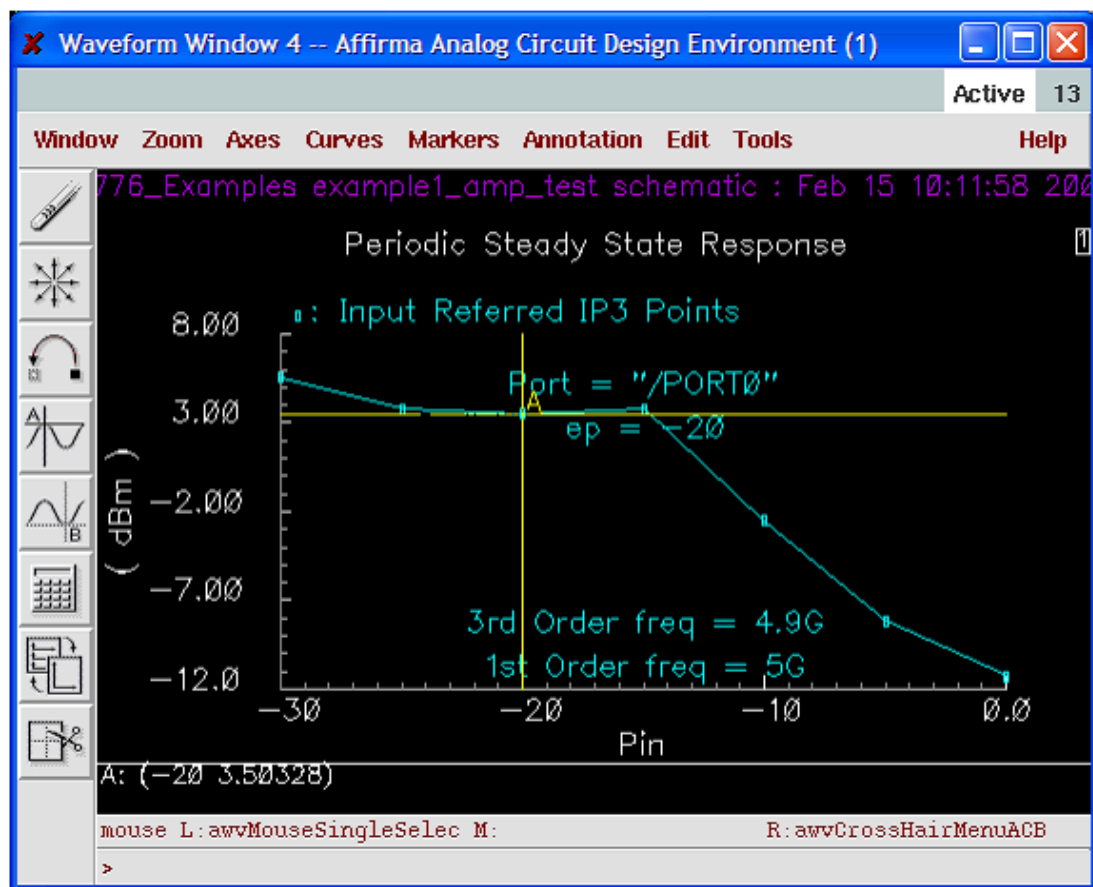
下一步，进行以下设置，在 pss 结果图上来找到输入 1dB 压缩点：

1. Plot Mode -> Replace
2. Analysis -> pss
3. Function -> Compression Point
4. Select -> Port (fixed R(port))
5. Gain Compression (dB) -> 1
6. Extrapolation Point -> Default (-30)
7. Input Referred 1dB Compression
8. 1st order Harmonic -> 50 (5G)
9. 从原理图上选择输出端口
10. 点击 replot

图表应当显示 1-dB 压缩点大约在 -7 dBm 处。



7. Plot -> Points
8. Input referred IP3
9. Order -> 3rd
10. 3rd order Harmonic -> 49 (4.9 GHz)
11. 1st order Harmonic -> 50 (5 GHz)
12. 从原理图上选择输出端口
13. 点击 replot。

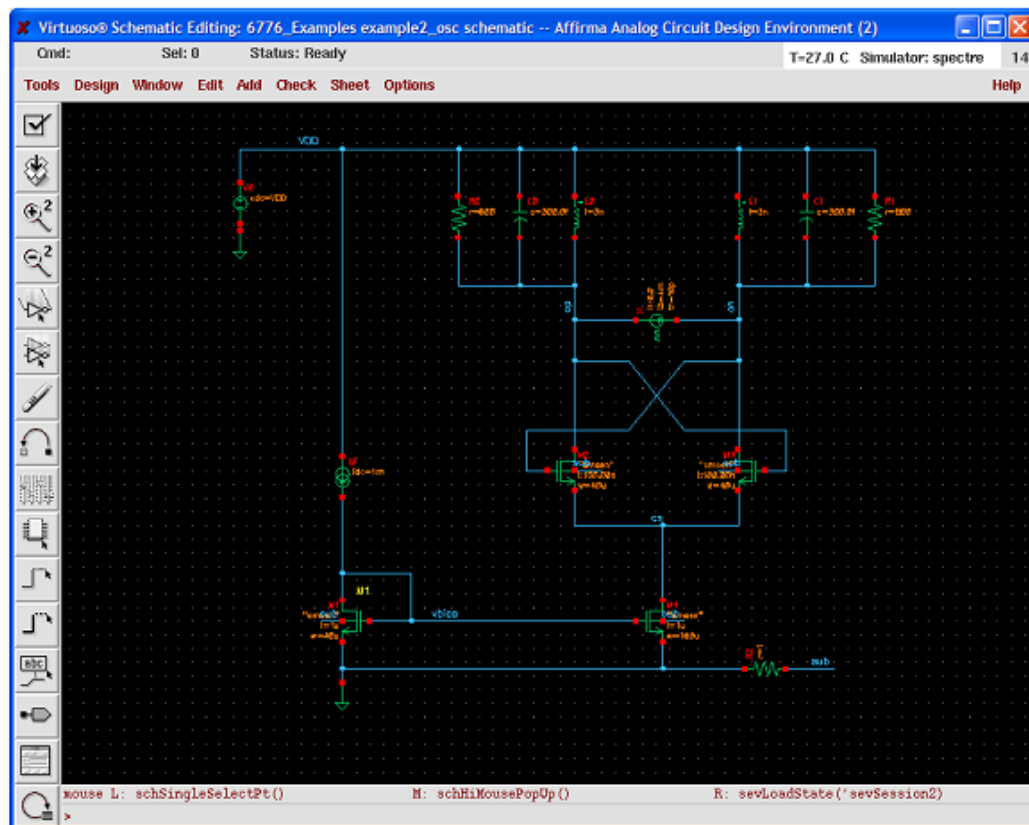


在 Pin 为 -20 dBm 处，图表显示输入 IP3 为 3.5 dBm。请注意，曲线一直到 Pin 的 -15 dBm 处还相当平坦。一般来说，输入功率的 IP3 比输入 1B 压缩点大约高 10 dB。既然输入压缩点是 -7 dBm，管脚的 IIP3 在 -20 dBm 处是合适的。

我们总结一下这个窄带 RF 放大器例子的仿真。这个教程中所做的分析已经作为 Session States 被保存在 example1_amp_test 中，原理图在 6776_Examples 中。打开原理图，左键单击 Tools -> Analog Environment，然后在 Affirma 窗口左键单击 Session -> Load State 来运调入 ac、瞬态、pss 或者 s 参数仿真的设置。

振荡器例子

下面，我们使用交流，瞬态特性和周期稳态分析来仿真振荡电路。基于以下电路图创建一个新的原理图。这一原理图可以在 6776_Examples library 中找到。这就是 example2_osc。这一次不用创建 symbol。这个原理图的仿真设置用 allsims 名字保存。

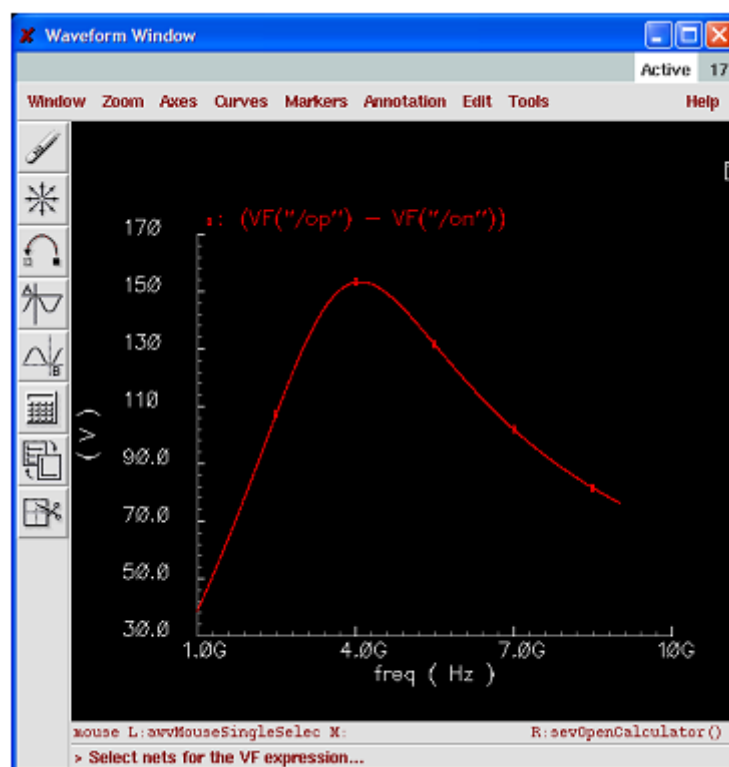


我们用三种方式找到该振荡电路的振荡频率。首先，我们做一个快速交流仿真来估计它。接着，我们用电流脉冲来驱动电路，使电路在瞬态仿真下达到稳态。最后，我们使用 Spectre RF 的周期稳态分析 (pss) 仿真电路以及找到它的相位噪声。在 op 和 on 结点之间的理想电流源被用来提供一个交流输入以及脉冲电流。如下表填写电流源参数。

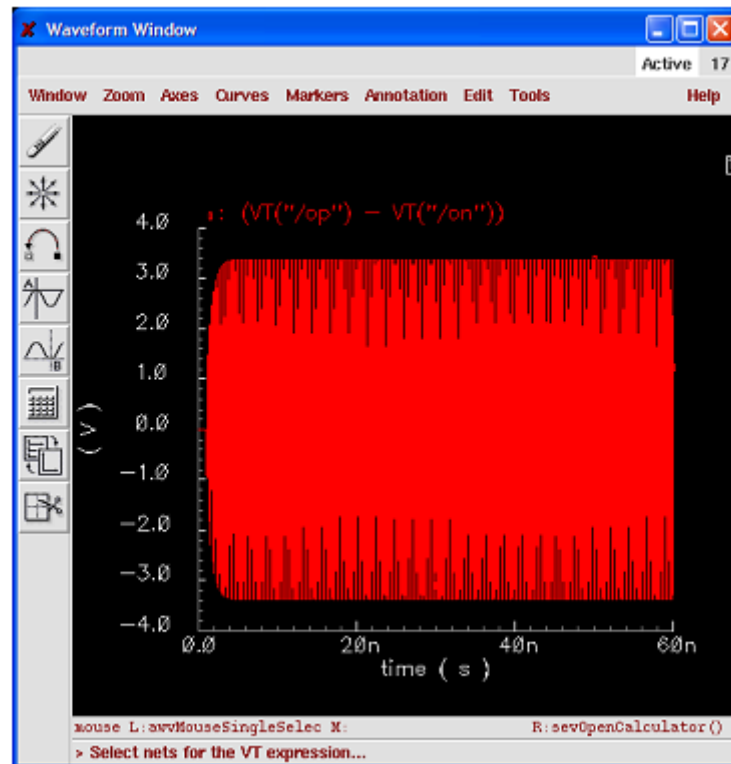
左键点击 Tools -> Analog Environmen 来加载 Affirma Analog Design Environment。你又要设置 library 的模型并重新定义比如 VDD 的变量，或者，你可以从 Affirma 窗口中选择 Session -> Load State 来调入你以前的例子所保存的状态。设置以下仿真：

1. 交流仿真
 - a. 从 1 GHz 到 9 GHz 线性扫描
 - b. 步长为 1 Mhz
2. 瞬态仿真
 - a. stop time 为 60n
 - b. accuracy default 为 moderate

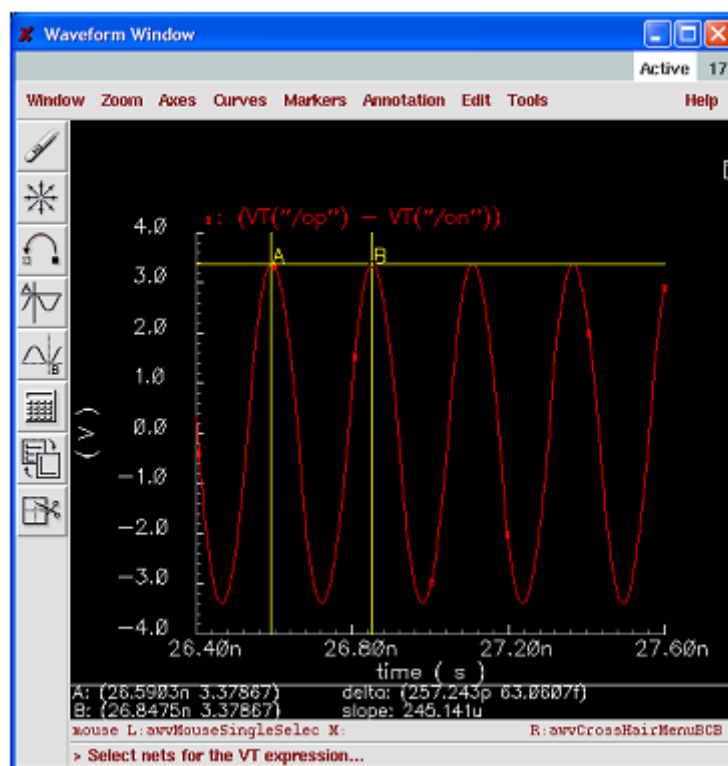
对交流和瞬态都进行仿真并作出 (op-on) 差分输出的波形。对正弦波形加标记点来计算瞬态情况下的振荡频率。试着绘出的输出信号的 FFT 图，以此来测量振荡频率。这个方法的困难在哪里？



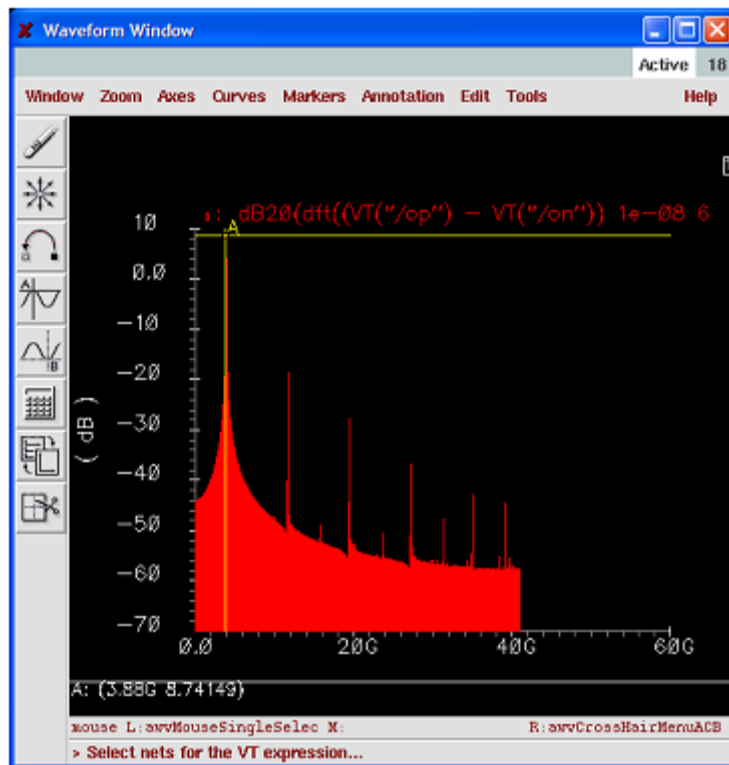
AC 差动输出



瞬态差动输出



瞬态波形周期=257.243ps

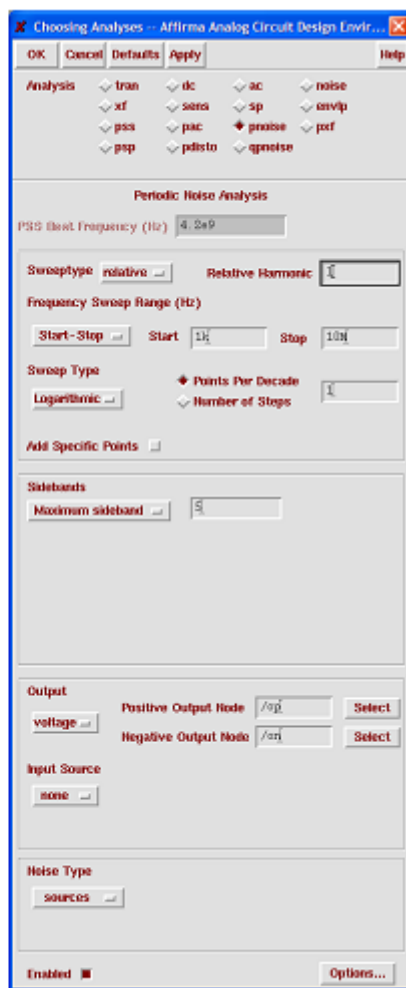
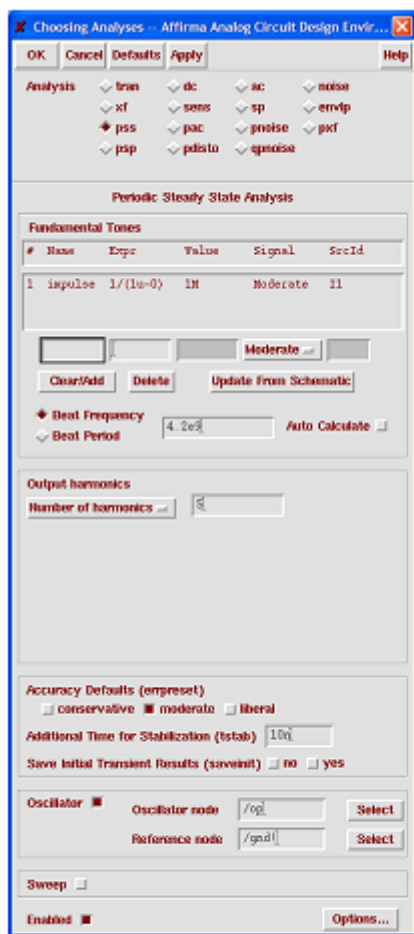


瞬态输出波形的 FFT

振荡器的 PSS 和 Pnoise 分析

现在我们将使用 pss 来克服使用 AC 和瞬态对振荡电路进行仿真时的一些限制。
用 PSS 我们可以在电路的频率域中得到精确的振荡频率，并且可以进行相位噪声仿真。

按照下表所示设置 pss 和 pnoise 分析。



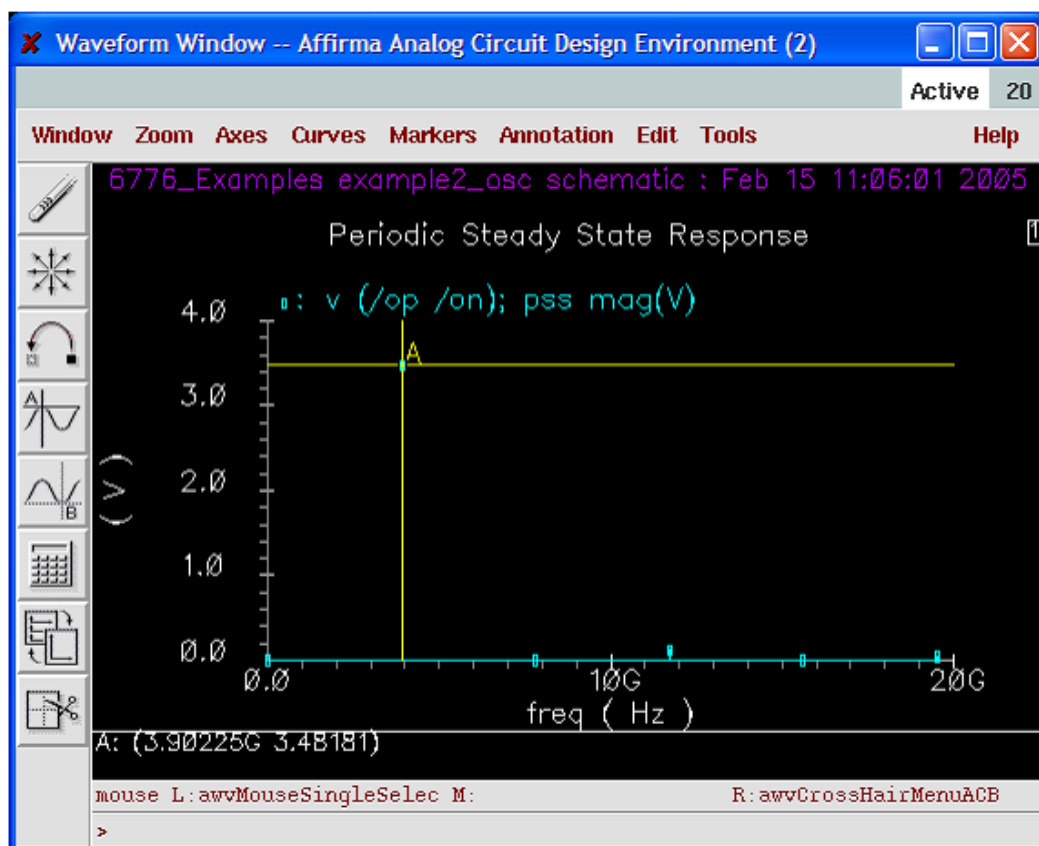
在 pss 表中，我们基于以前的瞬态仿真在 beat frequency 方框中填入一个估计的振荡频率。比实际振荡频率偏高的估计值可以有助于仿真器收敛。

我们要求仿真器收集 beat frequency 为 4.2 GHz 时的 5 次谐波的信息。如果你选择更多的谐波，仿真会变得更加准确，需要花费的时间也越长。

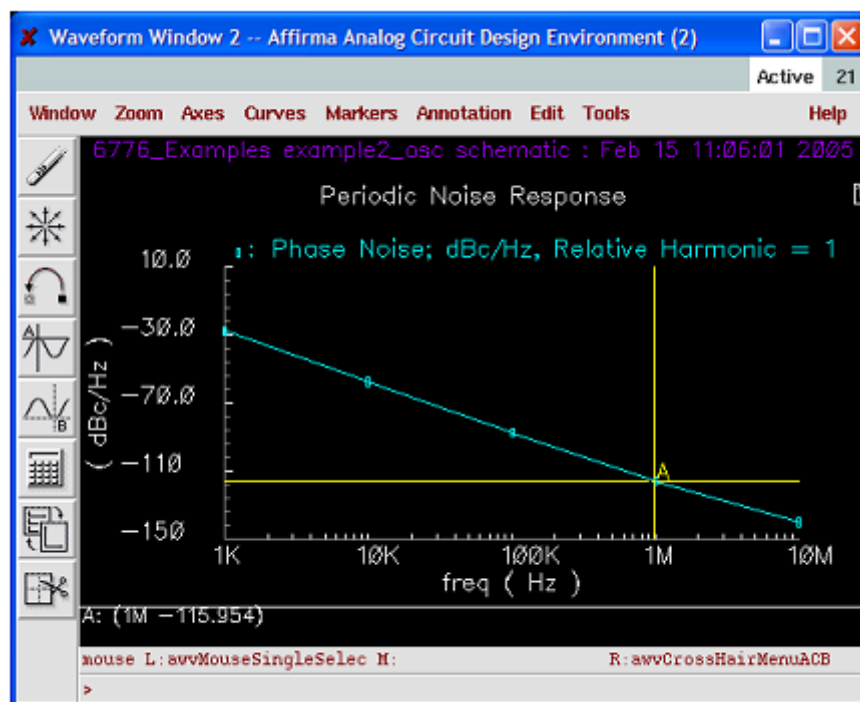
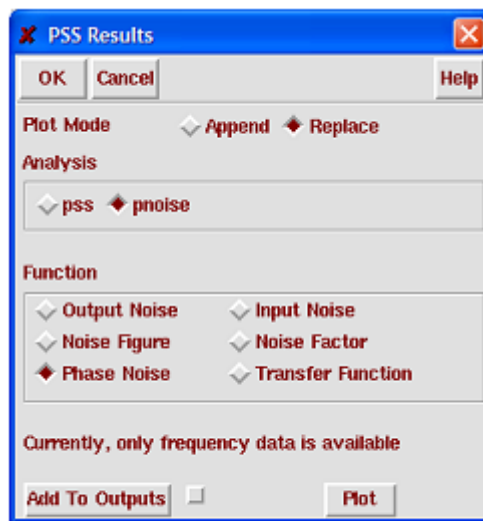
在 pnoise 表格中，我们将相位噪声计算的频偏的 Sweeptype 选择为 relative。频偏由 1 kHz 到 10 MHz 进行扫描，与输出波形的一次谐波相关。

运行仿真并用 Results -> Direct Plot -> PSS 对结果进行绘图。
进行以下设置，从 PSS 的结果中得到差动输出的振荡频率和振幅。

1. Plot Mode -> Replace
 2. Analysis -> pss
 3. Function -> Voltage
 4. Select -> Differential Nets
 5. Sweep -> Spectrum
 6. Signal Level -> Peak
 7. Modifier -> Magnitude
 8. 在原理图中用点击来选择 op 和 on 差动结点
- 什么是振荡频率和振荡振幅？



现在，利用 PSS 结果表格，按照以下设置来绘制相位噪声图



也可以运用 Results -> Print -> PSS Noise Summary 来分析相位噪声中单个噪声的贡献。

在这个表格中，我们会发现在 1MHz 频偏处，贡献相位噪声的前 10 个噪声源。

打印

原理图：

- 1) 在原理图窗口点击 Design -> Plot -> Submit
- 2) 在 Plot With 下，取消 Header
- 3) 点击右下角的 Plot Options
- 4) 点击 Send Plot Only To File，输入以 .eps 结尾的文件名。
- 5) 在 Plot Options 窗口下点击 OK
- 6) 在 Submit Plot 窗口下点击 OK 来打印

波形：

- 1) 在波形窗口点击 Window -> Hard Copy
- 2) 在 Plot With 下，取消 Header
- 3) 点击 Send Plot Only To File，输入以 .eps 结尾的文件名。
- 4) 在 Hard Copy 窗口点击 OK 进行打印

导出数据到 Matlab

你可以通过首先把数据打印到一个文本文件来间接导出数据到 Matlab。一般的做法是使用内置计算器的 printvs 功能。

- 1) 使用 calculator，选择所需的输出信号
- 2) 点击 calculator 窗口的 printvs
- 3) 此时会出现 Printvs Range 视窗。定义你想要的输出信号的数值范围，比如：交流信号的频率范围或者是瞬态信号的时间范围。
- 4) 此时会出现 Results Display 窗口。你的数据将以数组形式显示。点击 Window -> Print ...然后选择 Print To -> File。键入一个以 .txt 为结尾的文件名。
- 5) 然后，你可以从 .txt 文件将数组数据输入到 Matlab。