

RF IC放大器在Keysight Genesys和SystemVue中非线性仿真

Eamon Nash, 应用总监

简介

传统上, 线性和非线性RF电路仿真占据了不同领域。为了仿真级联小信号增益和损耗, RF设备设计人员传统上一直广泛使用S参数器件模型。由于缺乏数字形式的数据(如IP3、P1dB和噪声), 而且常用RF仿真器中从来没有频率变化模型结构, 所以传统方式中非线性仿真更具挑战性。RF电路设计人员通常采用自制的电子表格来计算级联噪声和失真。但是, 这些电子表格难以模拟系统级特性, 例如误差矢量幅度(EVM)和邻道泄漏比(ACLR); 当信号链由调制信号驱动时, 这些特性变得很重要。

本文将探讨一些将线性S参数数据与非线性数据(如噪声系数、

IP3、P1dB和 P_{SAT})相结合的RF放大器模型结构。本文还会展示系统级仿真结果, 以评估其对实际特性建模的准确程度。

S参数

S参数数据集是迄今为止使用非常广泛的RF仿真模型。它们是标准化的表格式数据集, 包括不同频率下的输入回波损耗、增益、反向隔离和输出回波损耗, 所有这些均为矢量格式。数据一般在驱动信号远低于信号压缩点的小信号条件下收集。S参数通常用于级联增益仿真、输入和输出匹配网络的设计以及稳定性的评估。然而, S参数不包含器件的噪声、压缩或失真特性的信息。

表1. 典型Sys参数数据集

ADPA7002AEHZ									
测试条件: $V_0 = 5\text{ V}$; $I_0 = 600\text{ mA}$; 温度 = 25°C									
频率(MHz)	增益(dB)	噪声系数(dB)	OP1dB (dBm)	RISO (dB)	OIP3 (dBm)	S11m (dB20)	S11a (°)	S22m (dB20)	S22a (°)
20,000	16.95	8.74	26.56	-67.721	36.44	-7.75	173.729	-11.557	147.426
21,000	17.68	8.24	26.91	-73.233	36.76	-8.517	80.526	-11.122	62.568
21,500	17.93	7.9	27.03	-68.951	36.88	-9.589	34.318	-11.311	22.785
22,000	17.93	7.36	27.17	-61.943	37.15	-10.697	-10.322	-11.509	-19.276
23,000	17.65	6.99	27.52	-59.98	37.96	-12.651	-103.636	-11.98	-97.33
23,500	17.56	6.81	27.74	-61.879	38.41	-14.063	-151.565	-12.827	-134.022
24,000	17.47	6.63	27.96	-80.139	38.73	-15.938	165.692	-12.945	-168.222
24,500	17.37	6.43	28.34	-58.564	38.86	-16.997	121.508	-13.498	148.481
25,000	17.29	6.21	28.76	-61.205	38.91	-17.923	62.549	-15.611	113.253
25,500	17.21	6.09	29.13	-78.557	38.99	-19.426	-7.015	-17.18	69.575
26,000	17.24	5.9	29.43	-57.547	39.12	-18.303	-66.409	-17.852	6.777
26,500	17.15	5.83	29.58	-52.009	39.13	-15.27	-111.709	-17.11	-77.28
27,000	17.18	5.77	29.67	-46.65	39.19	-12.005	-156.238	-14.802	-149.404
27,500	17.11	5.79	29.75	-46.267	39.31	-10.127	156.189	-13.119	156.549
28,000	17.06	5.68	29.81	-47.084	39.38	-9.77	110.867	-11.898	106.852
29,000	17.15	5.49	30.03	-44.2	39.84	-14.726	26.262	-12.296	20.551
30,000	17.09	5.53	30.07	-49.031	40.1	-19.255	-50.641	-10.565	-71.449

Keysight Sys-参数

表1列出了18 GHz至44 GHz、0.5 W功率放大器ADPA7002的sys-参数数据集的一部分。该sys-参数器件模型结构由Keysight定义，用于其PathWave RF频率合成(Genesys)和PathWave系统设计(SystemVue) RF电路与系统仿真器。数据集的表格结构包括了不同频率下的S参数数据以及相应的噪声、三阶交调和1 dB压缩数据。这些数据集提供了足够的信息，支持对RF信号电平、级联增益和反向隔离进行仿真。但是，IP3、P1dB和噪声系数数据的纳入为RF功率扫描和信噪比仿真提供了可能性。另外，还可以在器件的工作频率范围内进行高阶信号特性仿真，例如ACLR和EVM。

ADI公司维护着一个丰富的RF放大器和混频器sys-参数库，该库可供下载，而且也包含在Keysight Genesys和SystemVue安装程序中。图1显示了Keysight Genesys的屏幕截图。ADI公司的sys-参数库可通过**器件选择器**轻松获取。每个器件的sys-参数器件模型均包含表1所示的数据，以及模型**属性**窗口中包含的额外信息。此额外数据包括电源信息以及 P_{SAT} 和OIP2相对于OP1dB的默认偏移。

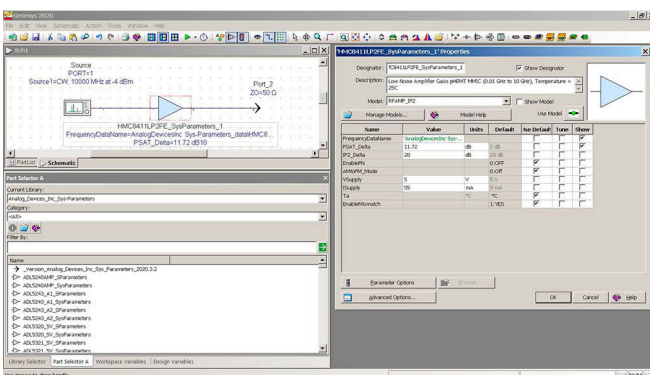
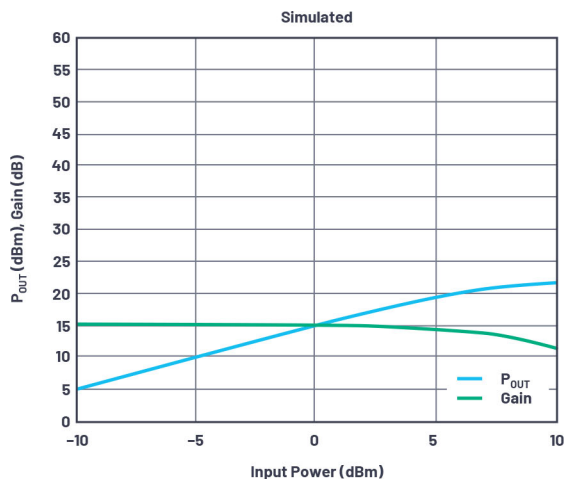


图1. Keysight Genesys屏幕截图, 展示了典型的sys-参数模型。

评估sys-参数模型的准确性

为了评估sys-参数模型的准确性，我们现在将对实测结果和仿真进行一系列比较。图2显示了HMC788A（10 MHz至10 GHz RF增益模块）在10 GHz时的功率扫描的实测和仿真结果。可以看到，仿真功率扫描与实测数据非常接近。仿真器使用器件的增益和0P1dB数据以及 $P_{SAT-Delta}$ 来生成所示的图形。在本例中， $P_{SAT-Delta}$ 为2 dB。这导致 P_{SAT} 值比0P1dB水平高2 dB，这是GaAs RF放大器的典型默认值。

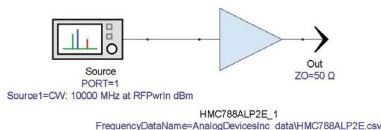
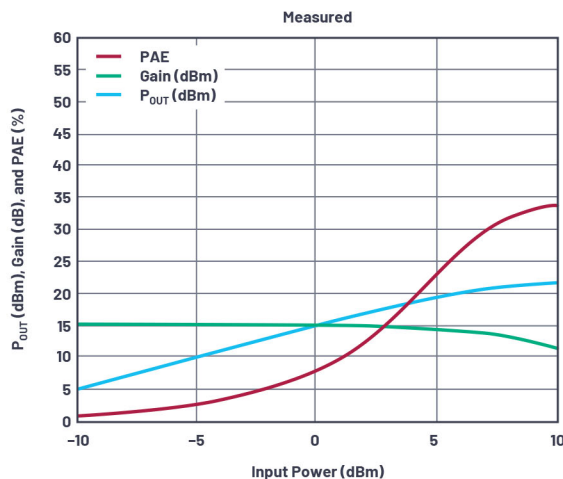


图2. 砷化镓(GaAs) RF放大器的实测和仿真功率扫描。

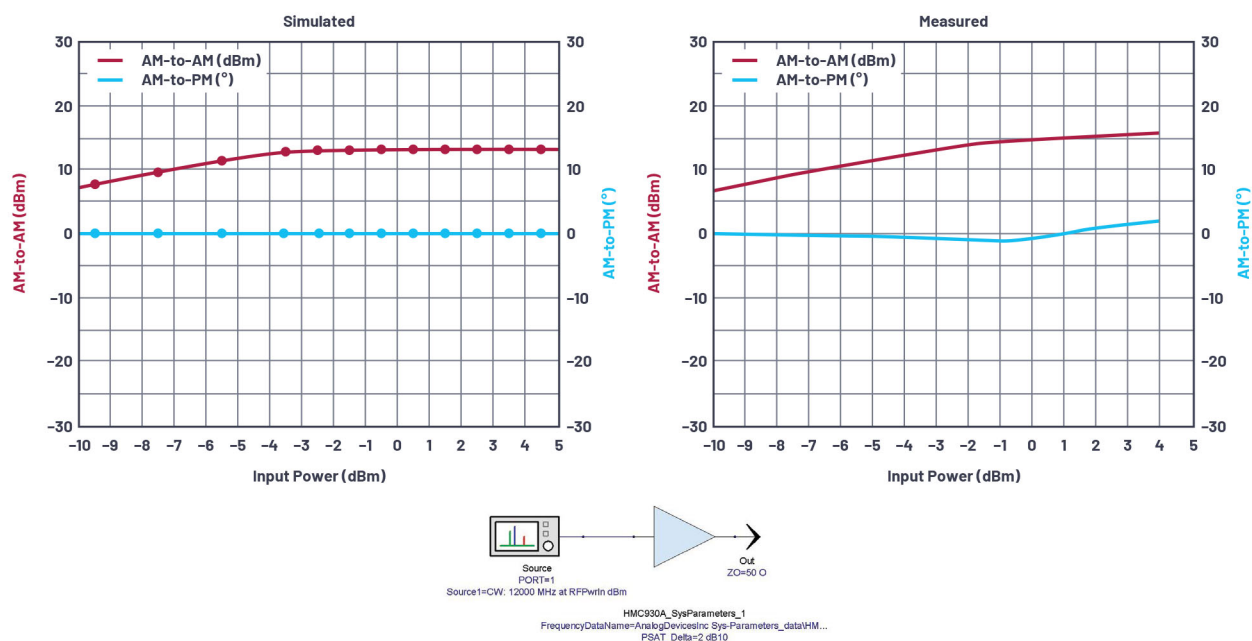


图3. AM到AM和AM到PM失真的仿真和测量。

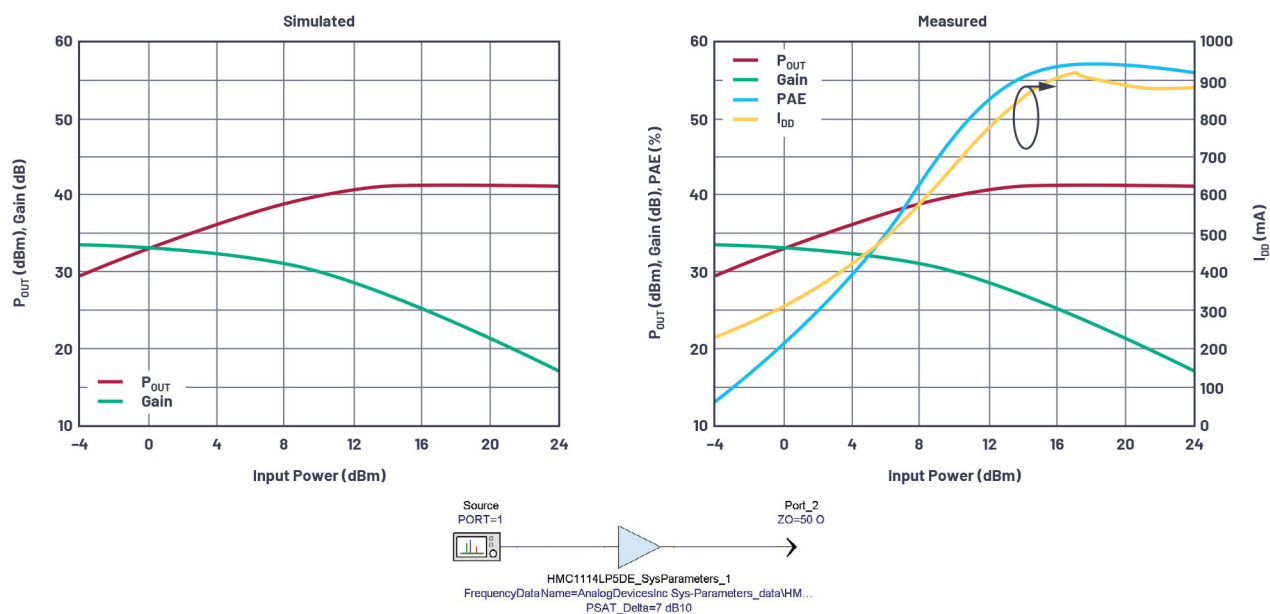


图4. HMC1114 (3.2 GHz、10 W GaN放大器) 的仿真和实测功率扫描。

AM到AM和AM到PM失真

为了更细致地研究仿真压缩特性，我们可以看看AM到AM和AM到PM失真。图3所示的实测和仿真结果是针对HMC930A的。测得的AM到AM失真与仿真非常接近。但是，仿真结果看不出AM到PM失真，这是不正确的。这是因为器件模型和数据集仅包含小信号相位信息（即S21）。虽然仿真器可以使用器件模型中的OIP1dB和P_{SAT}_Delta数据来估算AM到AM失真，但它没有任何大信号S参数数据可供使用。在这种情况下，使用更详细的模型，例如X-参数格式（X-参数模型内置与电平相关的S参数），会很合适。

氮化镓放大器的功率扫描仿真

图4显示了10 W氮化镓(GaN) RF放大器HMC114LP5DE在3.2 GHz时的功率扫描。GaN RF放大器的压缩特性往往比GaAs器件要缓和得多。这需要调整P_{SAT}_Delta，即1 dB压缩点与饱和点之差。在这种情况下，基于观察到的测量值，该变化量已设置为7 dB。虽然仿真器在某些情况下会因变化量较大而产生警告，但它仍会正确仿真并产生与实测性能非常接近的结果。

ACLR仿真

随着我们从CW信号测量和仿真转向调制信号，sys-参数数据集的价值变得更大。虽然有关器件增益、压缩、IP3和噪声系数的信息可在器件数据手册中轻松获得，但显示调制信号下性能的曲线不大可能在为一般用途而设计的器件数据手册中找到。另外，如果不进行仿真或测量，ACLR和EVM之类的指标也不容易预测。

图5显示了0.25 W的驱动放大器ADL5320在2140 MHz时，由5 MHz宽载波驱动下的功率扫描的仿真结果。仿真载波由11个均匀间隔的子载波组成，ACLR在5 MHz载波偏移下进行测量。

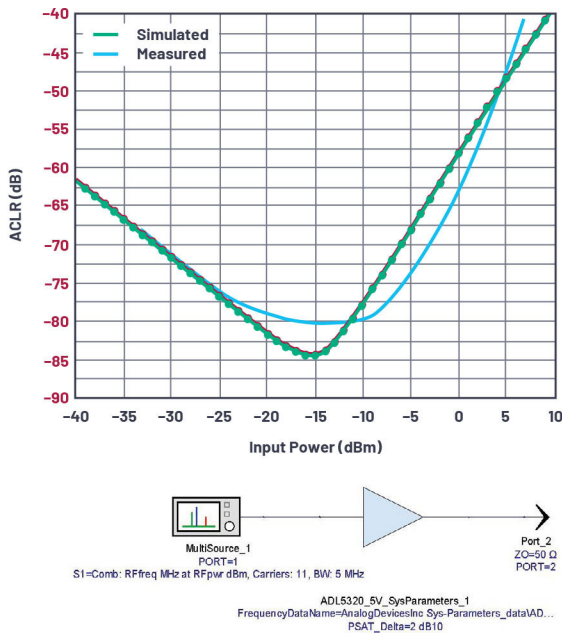


图5. ACLR仿真。

仿真表明，ACLR在-15 dBm的输入功率下达到了最优值。在此输入功率以下，ACLR以1 dB/dB的比率随输入功率而降低。曲线的此区域主要由噪声系数数据决定。当输入功率提高到-15 dBm以上时，ACLR的衰减速率与器件的IP3密切相关。值得注意的是，此仿真的结果依赖于噪声系数数据（低功率时）和IP3数据（高功率时）来产生在宽功率范围内都很准确的ACLR扫描。

该图还包括实测数据（蓝色）。对于-15 dBm的输入功率水平，它未达到相同的最优水平，这是由于测量设置的限制所致。值得注意的是，随着输入功率水平的增加，实测ACLR下降得更快。这是因为器件的OIP3会随输入/输出功率水平而稍有下降（理想情况下，它不应改变）。器件模型数据集中的IP3是单个数据集，不随功率水平而变化；可以认为它是器件的小信号IP3。这又是一个X-参数模型及其更详细的电平相关性建模可能会产生更准确仿真的例子。

EVM仿真

sys-参数模型还可用来可靠地进行EVM仿真。图6显示了EVM相对于RF功率扫描的实测和仿真结果，输入信号为1 MSPS、16 QAM载波，驱动50 MHz至4 GHz增益模块ADL5602。这表明在低功率和高功率水平下，测量与仿真之间都有出色的相关性。

温度仿真

ADI库中的默认sys-参数数据集仅包含环境温度数据。但是，通过向包含温度数据的数据集添加额外工作表可以扩展模型。图7显示了18 GHz至44 GHz、1 W功率放大器ADPA7007的数据集。该数据集具有多个工作表，包含-55°C、+25°C和+85°C下的增益、噪声和失真数据。Genesys和SystemVue仿真器可以利用这三个数据点生成其他温度下的插值数据，如图7所示。

在ADS中进行仿真

sys-参数数据集对Keysight Genesys和SystemVue是原生数据集，但不适用于Keysight ADS。有一种解决办法可以将sys-参数数据集导入ADS，从而进行噪声、失真和压缩仿真。这需要使用Amplifier2模型。Amplifier2模型对Keysight ADS是原生的，提供与sys-参数模型类似的功能。图8显示了包括Amplifier2模型的ADS原理图。该原理图还包含两个数据访问器件：DAC1和DAC2。这些DAC用于将sys-参数数据与Amplifier2模型相关联。噪声系数、OIP3和OIP1dB数据格式化为文本文件，并通过DAC1器件与Amplifier2模型相关联。DAC2器件用于将S-参数数据与Amplifier2模型相关联。这将在ADS中产生一个Amplifier2模型，使用该模型可执行上面讨论过的所有仿真，但是在Keysight ADS中执行。

使用此方法时须小心。当执行RF功率扫描，Amplifier2模型被强驱进入压缩时，仿真性能往往与观察到的实测性能有很大差异。此外，创建一个使用S-参数数据及噪声、失真和压缩数据的Amplifier2模型，适合于具有良好基线输入和输出回波损耗（S11和S22）的器件，大多数不需要外部RF匹配器件的ADI RF放大器就是这种情况。通过将标量增益添加到DAC1器件并省略S-参数数据（即省略DAC2），可以创建一个更简单的Amplifier2模型。

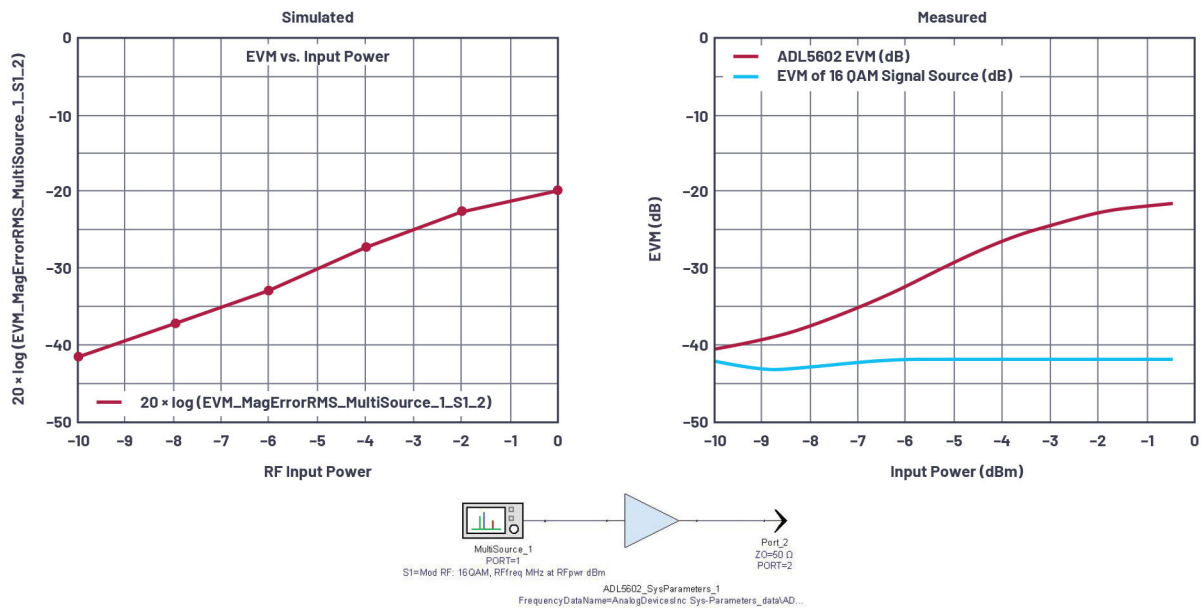


图6. 宽带增益模块的仿真和实测EVM功率扫描。

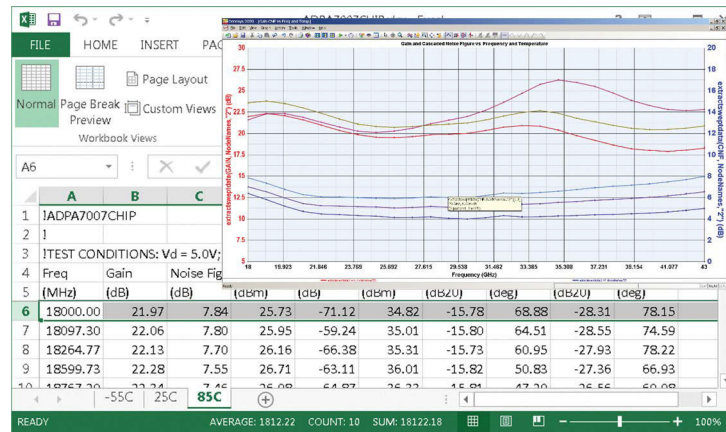


图7. 18 GHz至44 GHz、1 W功率放大器ADPA7007的仿真增益和噪声系数与温度的关系。

结论

sys-参数数据集代表了一种新颖且有用的RF放大器仿真工具。它们比S-参数更强大，后者不能进行噪声、失真和压缩建模。它们不像X-参数模型那么复杂，后者可以改善依赖模型级别的特性，例如AM到PM失真和ACLR。但是，sys-参数模型具有简单的表格式结构，可以通过将S-参数数据与噪声系数、OIP3和OP1dB数据结合起来轻松创建。仿真和实测数据的比较显示出极好的

一致性。尽管sys-参数模型无法在ADS中使用，但可以利用一个相对简单的流程来迁移数据集，以使用ADS原生的Amplifier2模型结构。

ADI公司致力于维护和扩充其sys-参数模型库。随着新模型添加到库中，我们将增加对温度仿真的支持。Keysight Genesys和SystemVue的最新库可以在analog.com/sys-parameters下载。

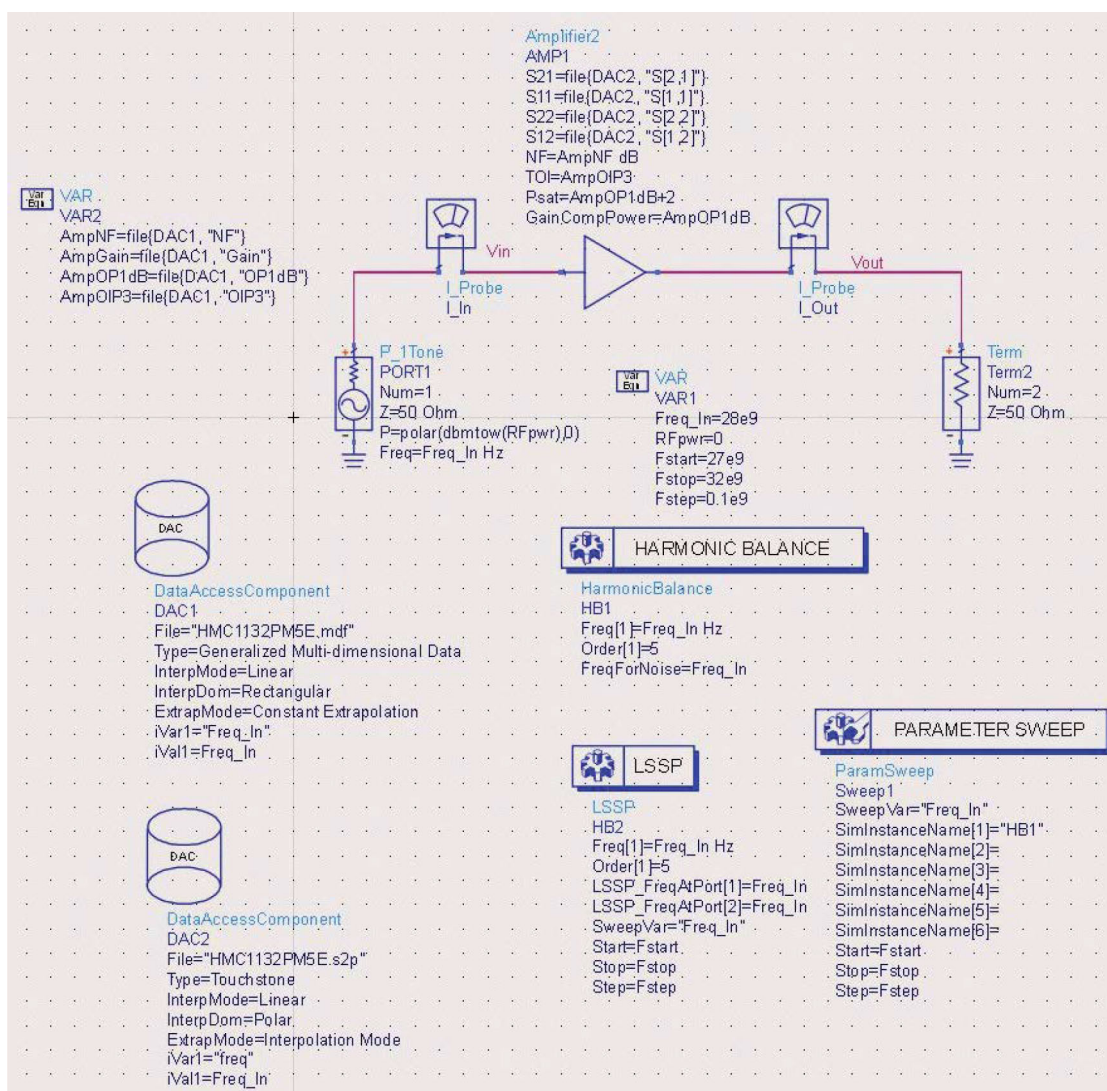


图8. 在使用Amplifier2模型的Keysight ADS中使用sys-参数数据。

参考文献

PathWave系统设计(SystemVue)。Keysight Technologies, 2020年。

PathWave RF频率合成(Genesys)。Keysight Technologies, 2020年。



作者简介

Eamon Nash是ADI公司的RF放大器和波束成型器应用总监。他已在ADI公司工作30年，担任过涉及混合信号、精密和RF产品的不同现场应用支持和工厂职位。他目前专注于面向卫星通信和雷达的RF放大器和波束成型器产品。他毕业于爱尔兰利默里克大学，获电子工程学士学位(B.Eng.)。他拥有5项专利。联系方式: eamon.nash@analog.com。

