

在 Keysight Genesys 和 SystemVue 中

# RF IC 放大器非線性模擬

■作者：Eamon Nash / ADI 應用總監

## 簡介

傳統上，線性和非線性 RF 電路模擬佔據了不同領域。為了模擬串聯小訊號增益和損耗，RF 設備設計人員傳統上一直廣泛使用 S 參數元件模型。由於缺乏數位形式的資料（如 IP3、P1dB 和雜訊），而且常用 RF 模擬器中歷來沒有頻率變化模型結構，所以傳統方式中非線性模擬更具挑戰性。RF 電路設計人員通常採用自製的試算表來計算串聯雜訊和失真。但是，這些試算表難以模擬系統級特性，例如

誤差向量幅度 (EVM) 和鄰道洩漏比 (ACLR)；當訊號鏈由調變訊號驅動時，這些特性就變得很重要。

本文將探討一些將線性 S 參數資料與非線性資料（如雜訊係數、IP3、P1dB 和 PSAT）結合的 RF 放大器模型結構。並展示系統級模擬結果，以評估其對實際特性建模的準確程度。

## S 參數

S 參數資料集是迄今為止使用非常廣泛的 RF

表 1: 典型 Sys 參數資料集

| ADPA7002AEHZ  |         |           |             |           |            |             |          |             |          |
|---|---------|-----------|-------------|-----------|------------|-------------|----------|-------------|----------|
| 測試條件：V <sub>D</sub> = 5 V；I <sub>D</sub> = 600 mA；溫度 = 25°C |         |           |             |           |            |             |          |             |          |
| 頻率 (MHz)  | 增益 (dB) | 雜訊係數 (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  |

模擬模型。它們是標準化的表格式資料集，包括不同頻率下的輸入回波損耗、增益、反向隔離和輸出回波損耗，這些均為向量格式。資料一般在驅動訊號遠低於訊號壓縮點的小訊號條件下收集。S 參數通常用於串聯增益模擬、輸入和輸出匹配網路的設計以及穩定性的評估。然而，S 參數不包含元件的雜訊、壓縮或失真特性的資訊。

## Keysight Sys- 參數

表 1 列出了 18 GHz 至 44 GHz、0.5 W 功率放大器 ADPA7002 的 sys- 參數資料集的一部分。該 sys- 參數元件模型結構由 Keysight 定義，用於其 PathWave RF 頻率合成 (Genesys) 和 PathWave 系統設計 (SystemVue) RF 電路與系統模擬器。資料集的表格結構包括了不同頻率下的 S 參數資料以及相應的雜訊、三階交調和 1 dB 壓縮資料。這些資料集提供了足夠的資訊，支援對 RF 訊號電平、串聯增益和反向隔離進行模擬。但是，IP3、P1dB 和雜訊係數資料的納入為 RF 功率掃描和訊號雜訊模擬提供了可能性。另外，還可以在元件的工作頻率範圍

圍內進行高階訊號特性模擬，例如 ACLR 和 EVM。

ADI 維護著一個豐富的 RF 放大器和混頻器 sys- 參數庫，該庫可供下載，而且也包含在 Keysight Genesys 和 SystemVue 安裝程式中。圖 1 顯示了 Keysight Genesys 的螢幕截圖。ADI 的 sys- 參數庫可透過元件選擇器輕鬆獲取。每個元件的 sys- 參數元件模型均包含表 1 所示的資料，以及模型屬性視窗中包含的額外資訊。此額外資料包括電源資訊以及 PSAT 和 OIP2 相對於 OP1dB 的默認偏移。

## 評估 sys- 參數模型的準確性

為了評估 sys- 參數模型的準確性，我們現在將對實測結果和模擬進行一系列比較。圖 2 顯示了 HMC788A (10 MHz 至 10 GHz RF 增益模組) 在 10 GHz 時的功率掃描的實測和模擬結果。可以看到，模擬功率掃描與實測資料非常接近。模擬器使用元件的增益和 OP1dB 資料以及 PSAT\_Delta 來產生所示的圖形。在本例中，PSAT\_Delta 為 2 dB。這導致 PSAT 值比 OP1dB 水準高 2 dB，這是 GaAs

圖 1: Keysight Genesys 螢幕截圖，展示了典型的 sys- 參數模型。

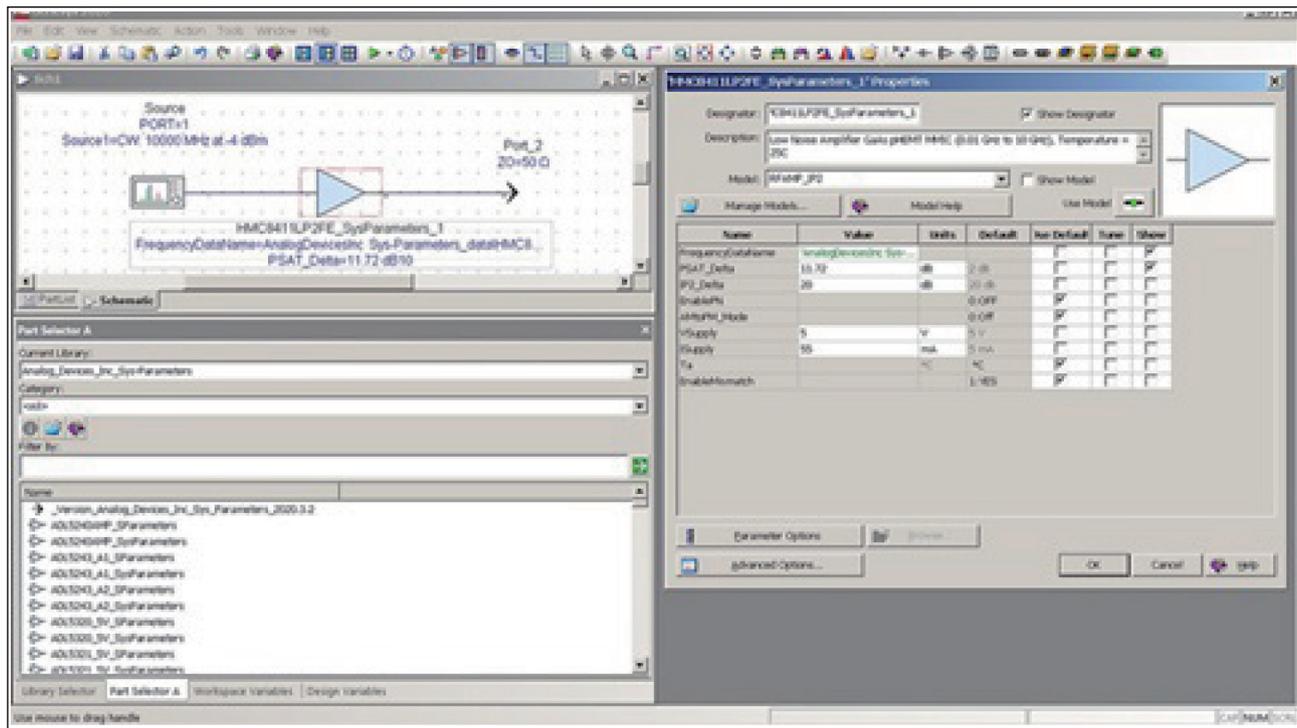


圖 2: 砷化鎵 (GaAs) RF 放大器的實測和模擬功率掃描。

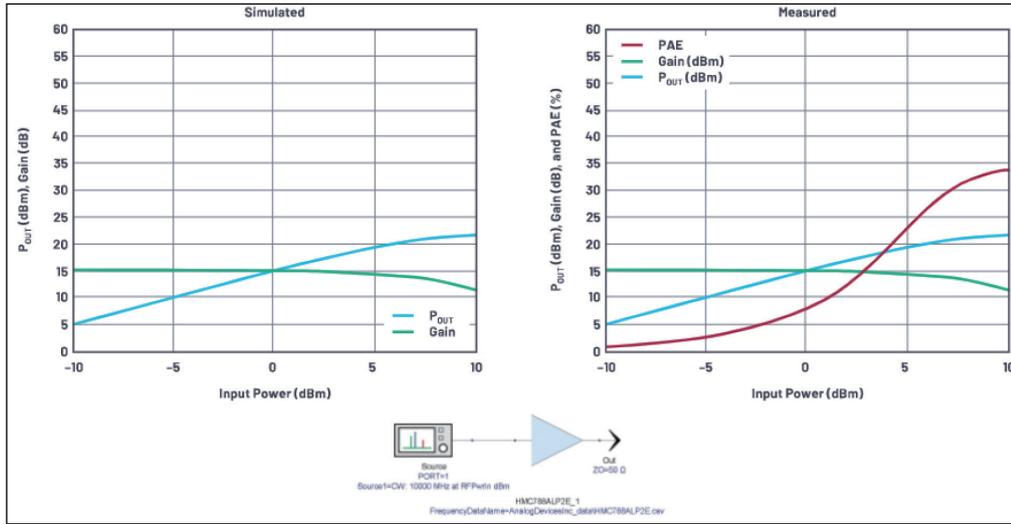


圖 3: AM 到 AM 和 AM 到 PM 失真的模擬和測量。

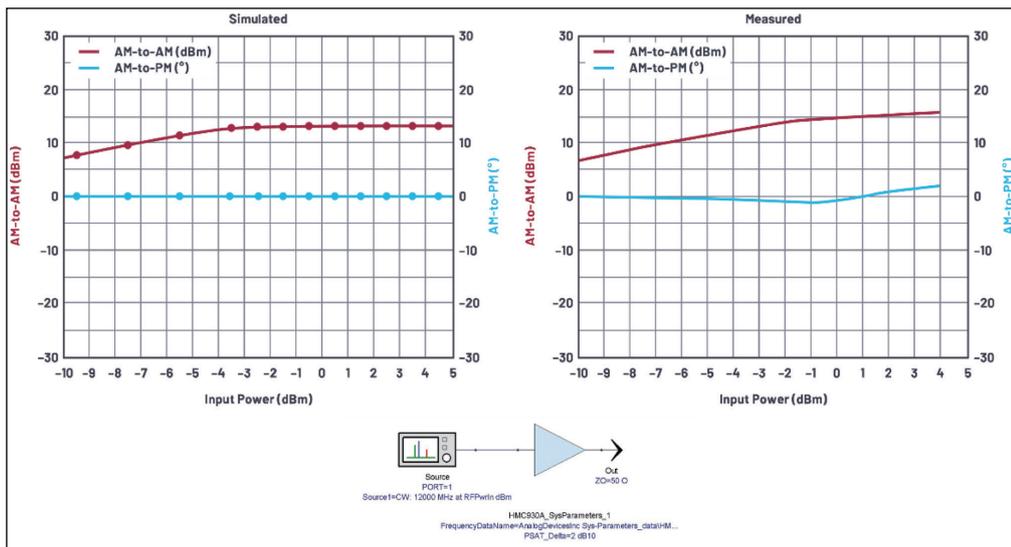
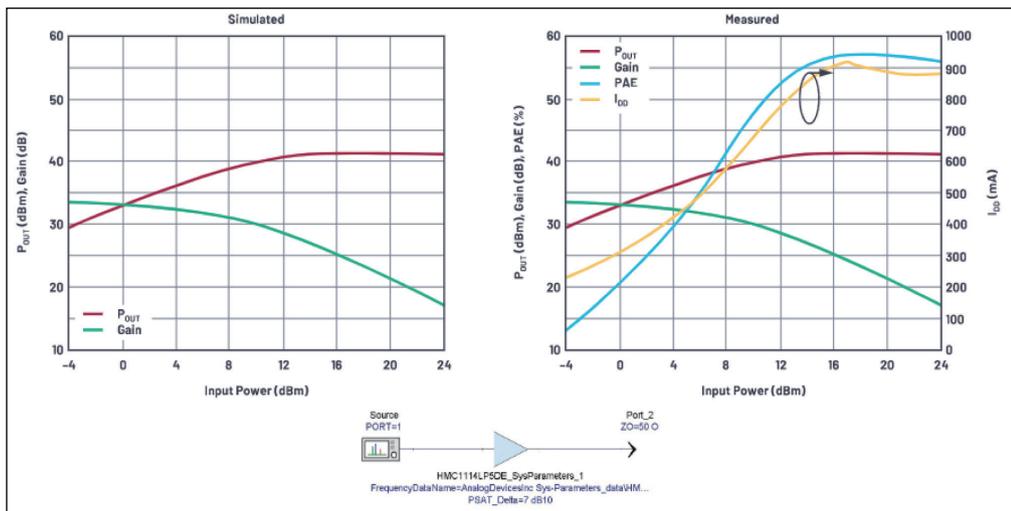


圖 4: HMC1114(3.2 GHz、10 W GaN 放大器) 的模擬和實測功率掃描。



RF 放大器的典型預設值。

## AM 到 AM 和 AM 到 PM 失真

為了更細緻地研究模擬壓縮特性，我們可以看看 AM 到 AM 和 AM 到 PM 失真。圖 3 所示的實測和模擬結果是針對 HMC930A 的。測得的 AM 到 AM 失真與模擬非常接近。但是，模擬結果看不出 AM 到 PM 失真，這是不正確的。這是因為元件模型和資料集僅包含小訊號相位資訊 (即 S21)。雖然模擬器可以使用元件模型中的 OP1dB 和 PSAT\_Delta 資料來估算 AM 到 AM 失真，但它沒有任何大訊號 S 參數資料可供使用。在這種情況下，使用更詳細的模型，例如 X-參數格式 (X-參數模型內建與位準相關的 S 參數)，會很合適。

## 氮化鎵放大器的功率掃描模擬

圖 4 顯示了 10

W 氮化鎵 (GaN) RF 放大器 HMC1114LP5DE 在 3.2 GHz 時的功率掃描。GaN RF 放大器的壓縮特性往往比 GaAs 元件要緩和得多。這需要調整 PSAT\_Delta，即 1 dB 壓縮點與飽和點之差。在這種情況下，基於觀察到的測量值，該變化量已設定為 7 dB。雖然模擬器在某些情況下會因變化量較大而產生警告，但它仍會正確模擬並產生與實測性能非常接近的結果。

## ACLR 模擬

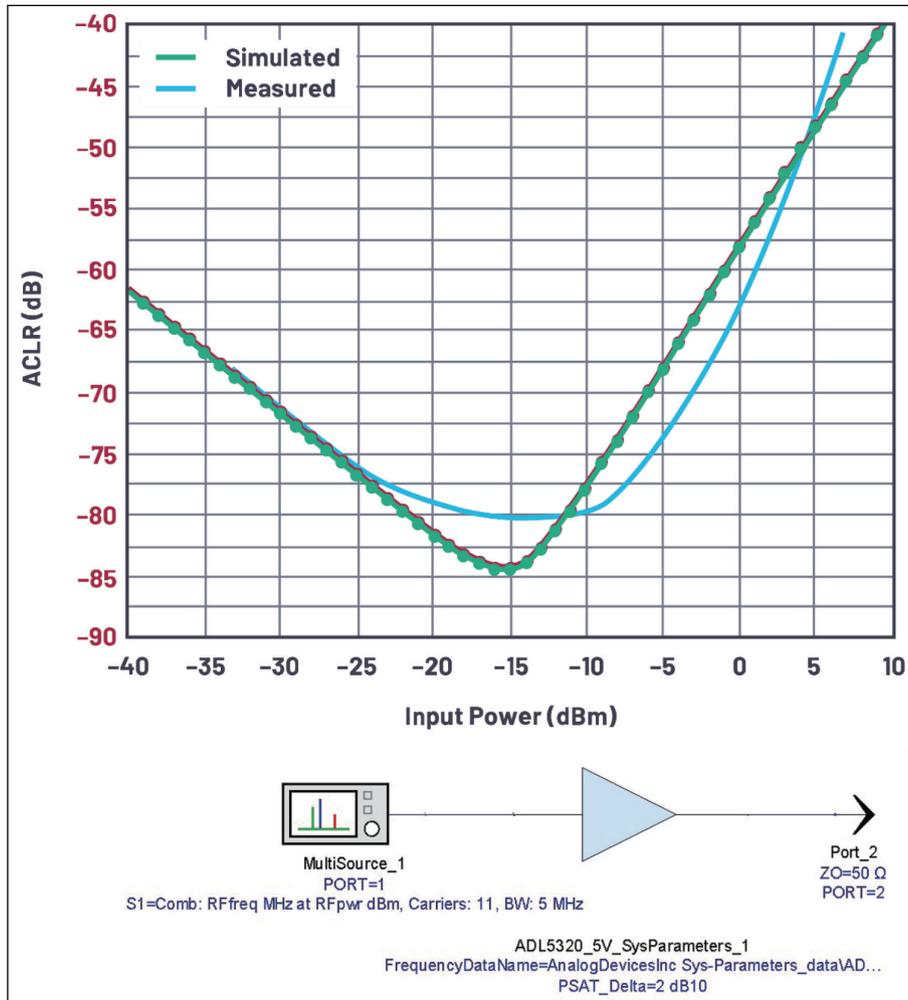
隨著我們從 CW 訊號測量和模擬轉向調變訊號，sys- 參數資料集的價值變得更大。雖然有關元件增益、壓縮、IP3 和雜訊係數的資訊可在元件產品手冊中輕鬆獲得，但顯示調變訊號下性能的曲線

不大可能在為一般用途而設計的元件產品手冊中找到。另外，如果不進行模擬或測量，ACLR 和 EVM 之類的指標也不容易預測。

圖 5 顯示了 0.25 W 的驅動放大器 ADL5320 在 2140 MHz 時，由 5 MHz 寬載波驅動下的功率掃描的模擬結果。模擬載波由 11 個均勻間隔的子載波組成，ACLR 在 5 MHz 載波偏移下進行測量。

模擬顯示，ACLR 在 -15 dBm 的輸入功率下達到了較優值。在此輸入功率以下，ACLR 以 1 dB/dB 的比率隨輸入功率而降低。曲線的此區域主要由雜訊係數資料決定。當輸入功率提高到 -15 dBm 以上時，ACLR 的衰減速率與元件的 IP3 密切相關。值得注意的是，此模擬的結果依賴於雜訊係數資料 (低功率時) 和 IP3 資料 (高功率時) 來產生在寬廣功率範圍內都很準確的 ACLR 掃描。

圖 5: ACLR 模擬。



該圖還包括實測資料 (藍色)。對於 -15 dBm 的輸入功率水準，它未達到相同的最優水準，這是由於測量設定的限制所致。值得注意的是，隨著輸入功率水準的增加，實測 ACLR 下降得更快。這是因為元件的 OIP3 會隨輸入 / 輸出功率水準而稍有下降 (理想情況下，它不應改變)。元件模型資料集中的 IP3 是單個資料集，不隨功率水準而變化；可以認為它是元件的小訊號 IP3。這又是一個 X- 參數模型及其更詳細的位準相關性建模可能會產生更準確模擬的例子。

## EVM 模擬

sys- 參數模型還可用來可靠地進行 EVM 模擬。圖 6 顯示了 EVM 相對於 RF 功率掃描

的實測和模擬結果，輸入訊號為 1 MSPS、16 QAM 載波，驅動 50 MHz 至 4 GHz 增益模組 ADL5602。顯示在低功率和高功率水準下，測量與模擬之間都有卓越的相關性。

### 溫度模擬

ADI 庫中的預設 sys- 參數資料集僅包含環境溫度資料。但是，透過向包含溫度資料的資料集增加額外工作表可以擴展模型。圖 7 顯示了 18 GHz 至

圖 6: 寬頻增益模組的模擬和實測 EVM 功率掃描。

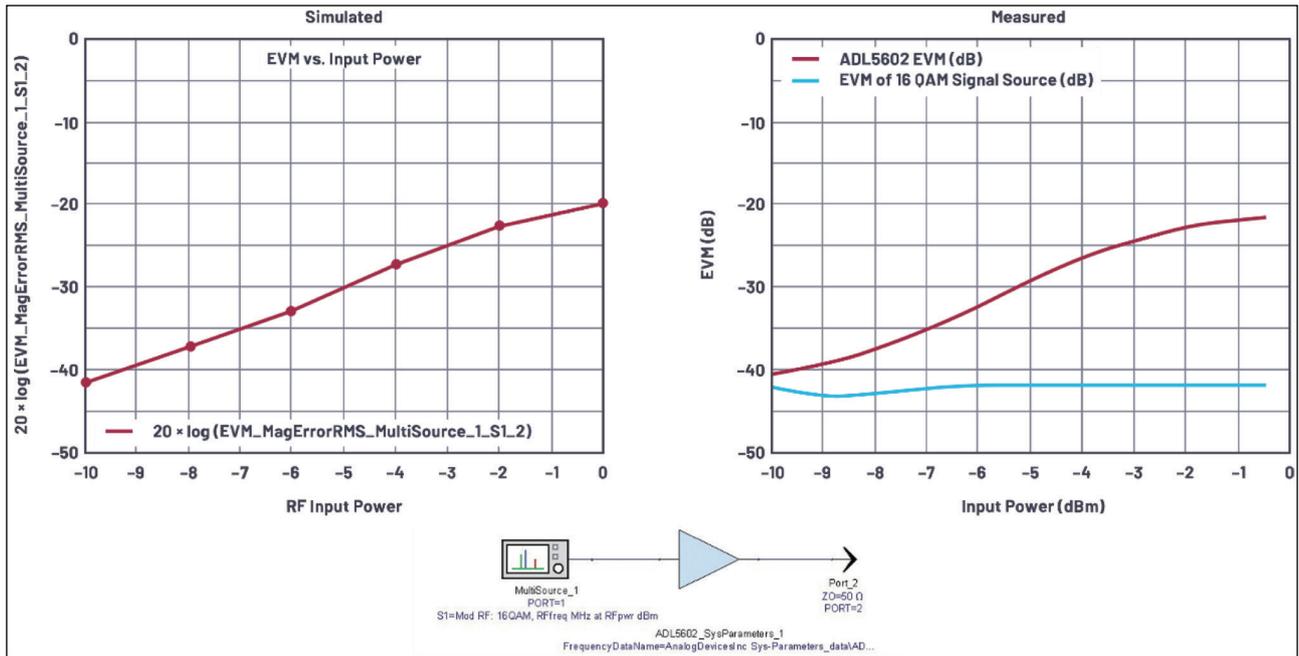
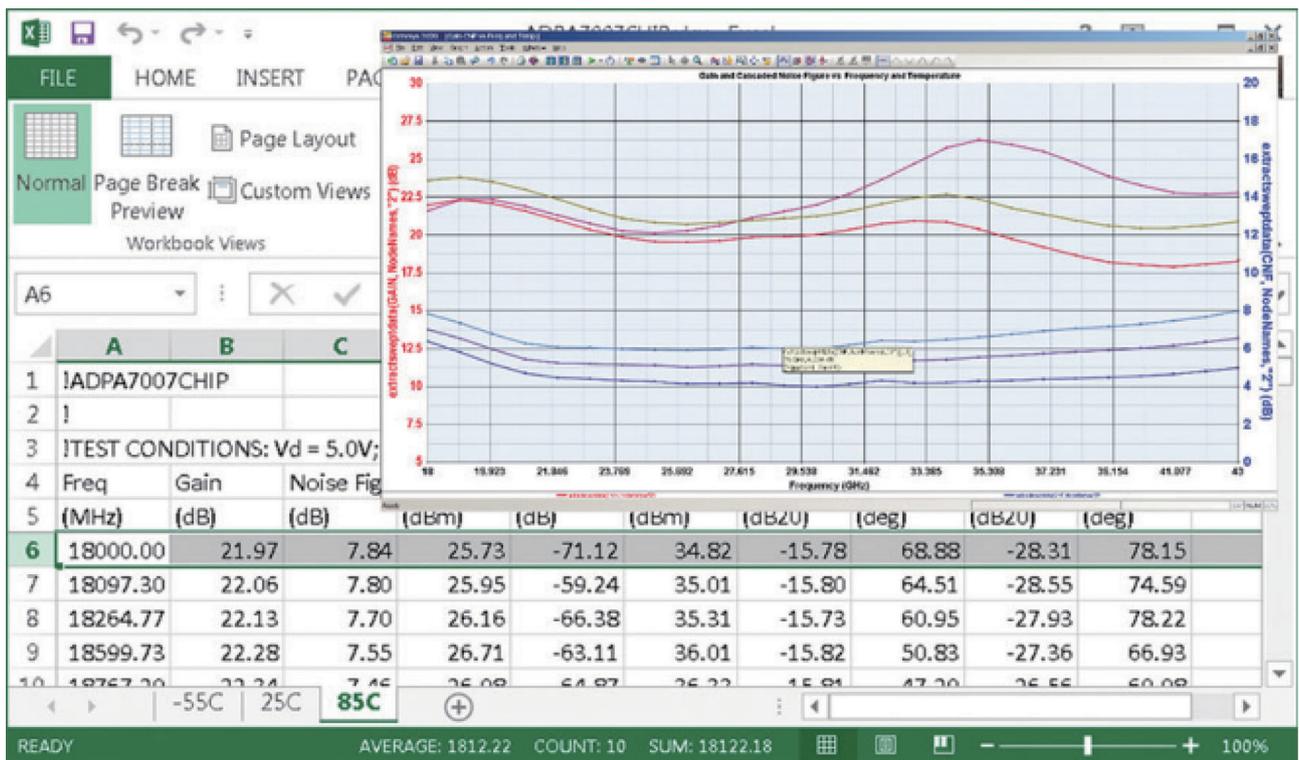


圖 7: 18 GHz 至 44 GHz、1 W 功率放大器 ADPA7007 的模擬增益和雜訊係數與溫度的關係。



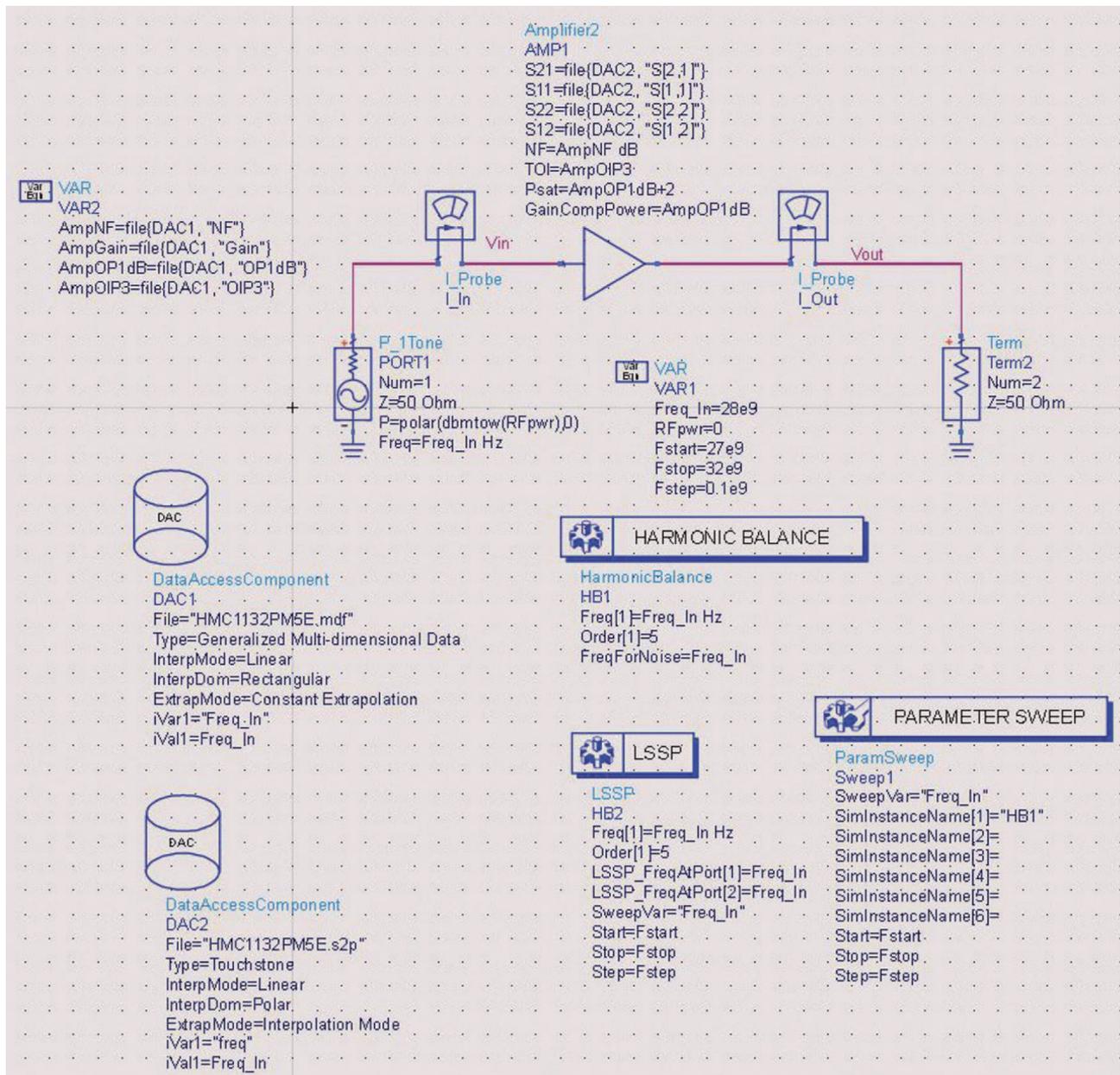
44 GHz、1 W 功率放大器 ADPA7007 的資料集。該資料集具有多個工作表，包含  $-55^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$  和  $+85^{\circ}\text{C}$  下的增益、雜訊和失真資料。Genesys 和 SystemVue 模擬器可以利用這三個資料點產生其他溫度下的插值資料，如圖 7 所示。

## 在 ADS 中進行模擬

sys- 參數資料集對 Keysight Genesys 和 SystemVue 是原生資料集，但不適用於 Keysight

ADS。有一種解決辦法可以將 sys- 參數資料集導入 ADS，從而進行雜訊、失真和壓縮模擬。這需要使用 Amplifier2 模型。Amplifier2 模型對 Keysight ADS 是原生的，提供與 sys- 參數模型類似的功能。圖 8 顯示了包括 Amplifier2 模型的 ADS 原理圖。該原理圖還包含兩個資料存取元件：DAC1 和 DAC2。這些 DAC 用於將 sys- 參數資料與 Amplifier2 模型相關聯。雜訊係數、OIP3 和 OP1dB 資料格式化為文字檔，並透過 DAC1 元件與 Amplifier2 模型相關

圖 8: 在使用 Amplifier2 模型的 Keysight ADS 中使用 sys- 參數資料。



聯。DAC2 元件用於將 S- 參數資料與 Amplifier2 模型相關聯。這將在 ADS 中產生一個 Amplifier2 模型，使用該模型可執行上面討論過的所有模擬，但是在 Keysight ADS 中執行。

使用此方法時須小心。當執行 RF 功率掃描，Amplifier2 模型被強驅進入壓縮時，模擬性能往往與觀察到的實測性能有很大差異。此外，創建一個使用 S- 參數資料及雜訊、失真和壓縮資料的 Amplifier2 模型，適合於具有良好基線輸入和輸出回波損耗 (S11 和 S22) 的元件，大多數不需要外部 RF 匹配元件的 ADI RF 放大器就是這種情況。透過將標量增益增加到 DAC1 元件並省略 S- 參數資料 (即省略 DAC2)，可以創建一個更簡單的 Amplifier2 模型。

## 結論

sys- 參數資料集代表了一種新穎且有用的 RF 放大器模擬工具。它們比 S- 參數更強大，後者不能進行雜訊、失真和壓縮建模。它們不像 X- 參數模型那麼複雜，後者可以改善依賴模型級別的特性，例如 AM 到 PM 失真和 ACLR，但 sys- 參數模型具有簡單的表格式結構，可以透過將 S- 參數資料與雜訊係數、OIP3 和 OP1dB 資料結合以輕鬆創建。模擬和實測資料的比較顯示出極佳的一致性。儘管 sys- 參數模型無法在 ADS 中使用，但可以利用一個相對簡單的流程來遷移資料集，以使用 ADS 原生的 Amplifier2 模型結構。

ADI 致力於維護和擴充其 sys- 參數模型庫。隨著新模型增加到此模型庫中，亦將持續增加對溫度模擬的支援。Keysight Genesys 和 SystemVue 的最新庫可以在 [analog.com/sys-parameters](http://analog.com/sys-parameters) 下載。

## 參考電路

- PathWave 系統設計 (SystemVue)。Keysight Technologies，2020 年。
- PathWave RF 頻率合成 (Genesys)。Keysight Technologies，2020 年。CTA

## 工研院 6 度榮獲全球百大創新機構獎

科睿唯安 (Clarivate) 頒發「2022 全球百大創新機構獎」給臺灣 9 家機構，得獎者包括：工研院、鴻海、聯發科技、廣達、台積電，以及首度進榜的友達光電、台達電子、緯創資通和瑞昱半導體。此次臺灣得獎機構數不但再創新高，領先英、法等國，高居全球第三。而且，在經濟部積極投入與支持下，工研院就五大專利指標：技術獨特性、影響力、全球化、成功足跡與數量上表現尤其優異，連續 5 年、第 6 度獲獎，不但是臺灣獲獎次數最多的機構，也勇奪亞太研發機構得獎之首。

在經濟部科研專案支持下，工研院積極擘畫「2030 技術策略與藍圖」，深耕跨領域前瞻技術研發，並深化全球專利布局，協助國內企業提升競爭力，更針對新趨勢，協助產業布局重要專利，完善智財保護網與建構產業生態鏈。例如，在 5G 多元應用方面，工研院不但與和碩聯合科技等廠商合作，提供廠商專網小型基地台快速佈建、效能最佳化等整合性解決方案技術及專利，亦攜手仁寶電腦、秀傳醫療體系以及達明機器人，透過行動邊緣運算等專利技術，共同研發全國首創的「5G 遠距超音波技術」，提供遠距超音波檢測會診服務，搶攻遠距醫護市場。在下世代半導體應用方面，工研院與車電業者正美企業以及健康運動產業業者寰波科技合作，研發軟性混合電子技術，積極導入車用電子與生技醫療領域，包括解決汽車中控台線路整合圖案變形問題，以及打造全球首創的軟性複合式智慧護膝等。在創新能源科技與系統方面，工研院攜手天行能源開發行動式太陽光電測試車，包括模組缺陷檢測、發電功率測試、模組破片或缺陷及模組之絕緣性量測，透過獨家專利技術提高測試驗證的靈活度與機動性，降低模組來往運輸的時間與風險，協助企業把關投資報酬率和提升品質。