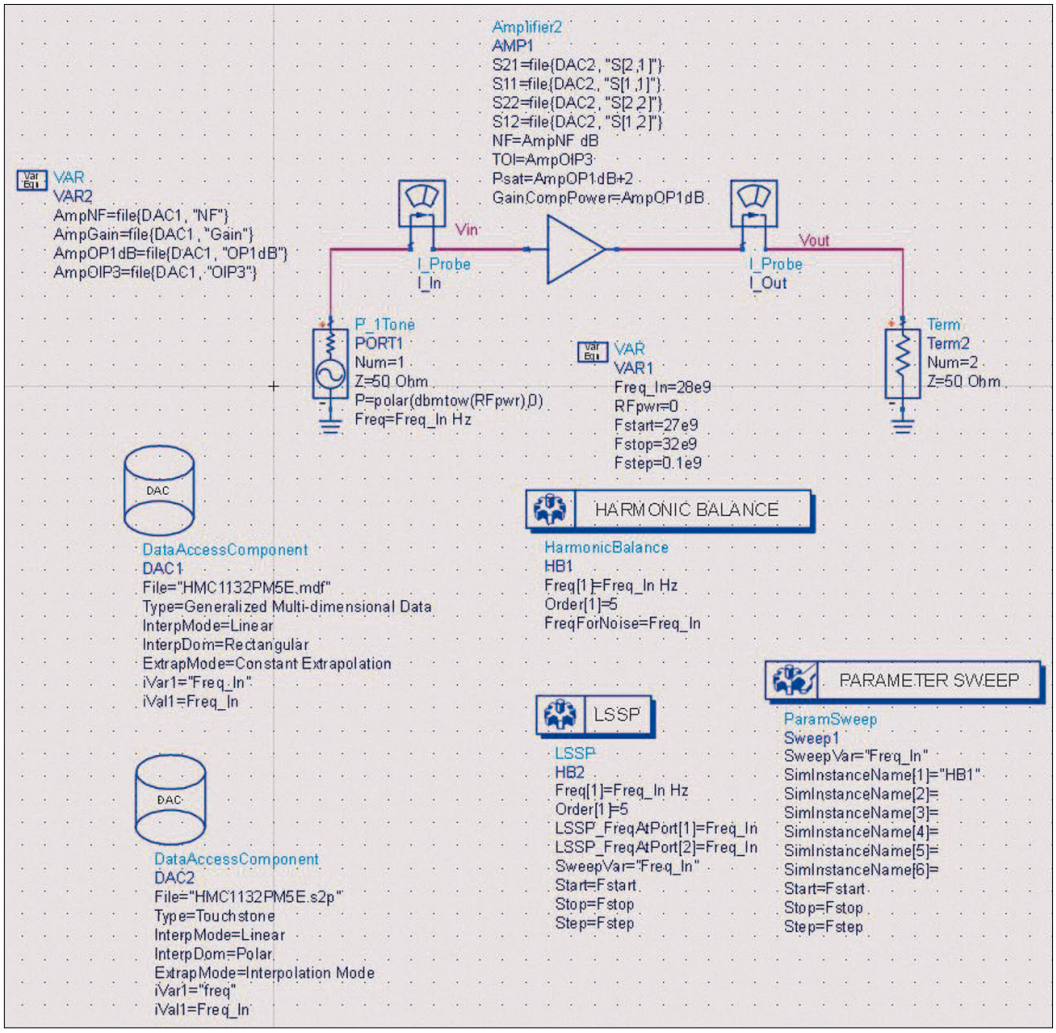
Nichtlineare Simulation integrierter HF-Verstärker mit Keysight Genesys und SystemVue

Der Artikel befasst sich mit einigen Modellstrukturen für HF-Verstärker, die lineare S-Parameter-Daten mit nichtlinearen Daten wie Rauschzahl, IP3, P1dB und PSAT kombinieren.



Verwendung von S-Parameter-Daten in Keysight ADS mithilfe des Amplifier2-Modells

Außerdem werden die Ergebnisse von Systemsimulationen gezeigt, um bewerten zu können, wie exakt das reale Verhalten nachgebildet wird.

Bisherige Simulationen

Lineare und nichtlineare Simulationen von HF-Schaltungen waren traditionell verschiedenen Bereichen vorbehalten. Um kaskadierte Kleinsignal-Verstärkungen und -Verluste zu simulieren, setzten Designer von HF-Systemen traditionell auf die weithin verfügbaren S-Parameter-Modelle ihrer Bauelemente. Die nichtlineare Simulation ist von jeher anspruchsvoller, was an der mangelnden Verfügbarkeit von Daten in digitaler Form (z.B. IP3, P1dB und Rauschen) sowie dem traditionellen Fehlen frequenzvariabler Modellstrukturen in gängigen HF-Simulatoren liegt. Designer von HF-Schaltungen griffen deshalb meist auf selbst erstellte Spreadsheets zurück, um kaskadierte Rausch- und Verzerrungswerte zu berechnen. Derartige Spreadsheets haben allerdings ihre Schwierigkeiten damit, System-Charakteristika wie den

Autor:
Eamon Nash, Applications Director
Analog Devices Inc.
www.analog.com/

Über den Autor

Eamon Nash arbeitet bei Analog Devices als Applications Director für HF-Verstärker und Beamformer. Im Feld ebenso wie in der Fabrik ist er für das Unternehmen seit 30 Jahren in verschiedenen Funktionen im Bereich der Mixed-Signal-, Präzisions- und HF-Produkte tätig. Den gegenwärtigen Schwerpunkt seiner Arbeit bilden HF-Verstärker und Beamformer-Produkte für Satcom- und Radaranwendungen. Nash hat an der University of Limerick (Irland) ein Bachelor-of-Engineering-Diplom in Elektronik erworben und ist Inhaber von fünf Patenten. Sie erreichen ihn unter eamon.nash@analog.com.

ADPA7002AEHZ									
Testbedingungen: V_D = 5 V; I_D = 600 mA; Temperatur = 25 °C									
Frequenz (MHz)	Verstärkung (dB)	Rauschzahl (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

Tabelle 1: Typischer Sys-Parameter-Datensatz

Fehlervektorbetrag (Error Vector Magnitude, EVM) und das Nachbarkanal-Leacking (Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR) zu simulieren, die zum Tragen kommen, sobald die Signalkette mit modulierten Signalen angesteuert wird.

S-Parameter sind das meistbenutzte HF-Simulationsmodell. Es handelt sich dabei um standardisierte tabellarische Datensätze aus Eingangsreflexionsfaktor, Verstärkung, Rückisolation und Ausgangsreflexionsfaktor als Funktion der Frequenz, alle in vektoriellem Format. Die Daten werden im Allgemeinen unter Kleinsignal-Bedingungen mit Treibersignalen erhoben, die weit unterhalb der Signal-Kompressionspunkte liegen. S-Parameter dienen in der Regel dazu, um die kaskadierte Verstärkung zu simulieren, ein- und ausgangsseitige Anpassungsnetzwerke zu entwickeln und die Stabilität zu bewerten. Sie enthalten jedoch keinerlei Informationen über die Rausch-, Kompressions- oder Verzerrungseigenschaften eines Bauelements.

Keysight Sys-Parameter

Tabelle 1 ist ein Ausschnitt aus dem Sys-Parameter-Datensatz für den ADPA7002, ein 0,5-W-Leistungungsverstärker für 18 bis 44 GHz. Die Sys-Parameter-Modellstruktur wurde von Keysight für die Verwendung in seinen HF-Schaltungs- und Simulatoren PathWave RF Synthesis (Genesys) und PathWave System Design (SystemVue) definiert. Die tabellarische Struktur des Datensatzes besteht aus Sys-Parameter-Daten im Verbund mit frequenzbezogenen Daten zum Rauschen, zum Intercept Point dritter Ordnung (IP3) und zum 1-dB-Kompressionspunkt (P1dB).

Diese Datensätze enthalten ausreichend Informationen zum Simulieren des HF-Signalpegels, der kaskadierten Verstärkung und der Rückisolation. Die Einbeziehung der IP3-, P1dB- und Rauschzahl-Daten erlaubt jedoch auch die Simu-

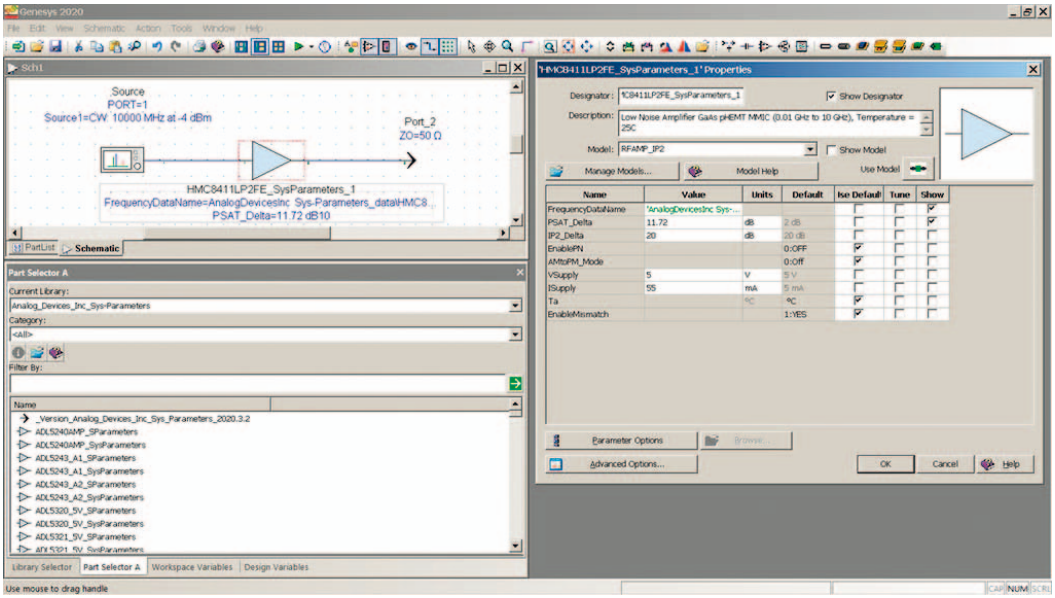


Bild 1: Dieser Screenshot aus Keysight Genesys zeigt ein typisches Sys-Parameter-Modell

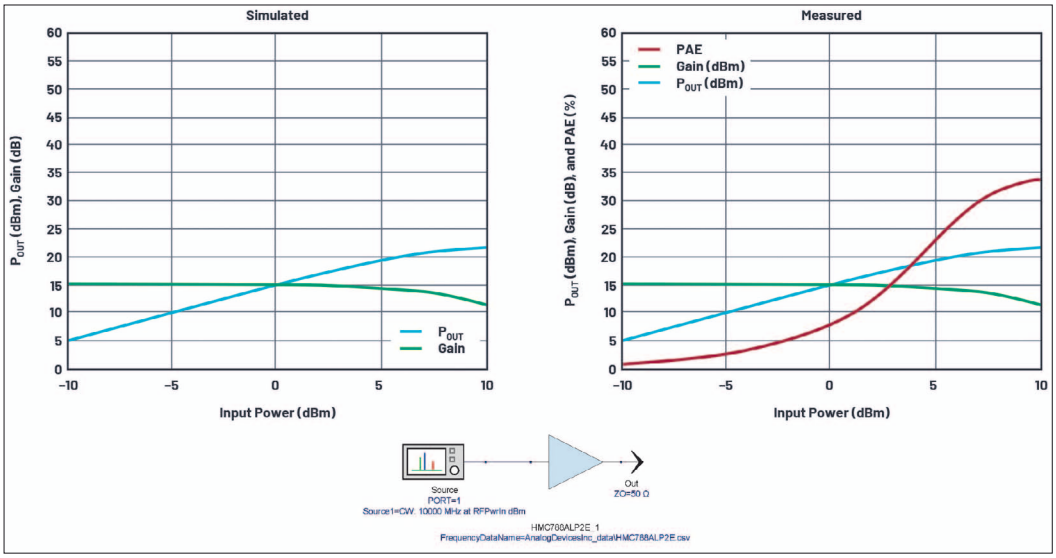


Bild 2: Gemessener und simulierter Power Sweep bei einem HF-Verstärker auf Galliumarsenid-Basis

lation von HF Power Sweeps, des Rauschabstands und auch Signalcharakteristika höherer Ordnung wie ACLR und EVM lassen sich über den Frequenzbereich des jeweiligen Bausteins hinweg simulieren.

Analog Devices verfügt über eine umfangreiche Sys-Parameter-Bibliothek für seine HF-Verstärker und -Mischer, die einerseits zum Download verfügbar ist und andererseits Bestandteil der Keysight Genesys- und SystemVue-Installationen ist. Bild 1 zeigt einen Screenshot von Keysight Genesys. Über den Part Selector kann umgehend auf die Sys-Parameter-Bibliothek von Analog Devices zugegriffen werden. Das Sys-Parameter-Modell für die einzelnen Bausteine umfasst die in Tabelle 1 aufgeführten Daten, ergänzt durch weitere Informationen im Properties-Fenster des Modells. Zu diesen ergänzenden Daten gehören neben Stromversorgungs-Informationen auch vorgegebene Offsets für PSAT und OIP2 relativ zu OP1dB.

Bewertung der Genauigkeit

Um die Genauigkeit von Sys-Parameter-Modellen zu bestimmen, sollen nun einige Vergleiche zwischen gemessenen Werten und Simulationen erfolgen. Bild 2 gibt die gemessenen und simulierten Resultate eines Power Sweeps bei 10 GHz mit dem HMC788A, einem RF Gain Block für Frequenzen von 10 MHz bis 10 GHz wieder. Wie man sieht, stimmt der simulierte Power Sweep sehr gut mit den gemessenen Daten überein. Der Simulator verwendet die Verstärkungs- und OP1dB-Daten des Bausteins zusammen mit PSAT_Delta, um das gezeigte Diagramm zu erzeugen. Im vorliegenden Fall beträgt PSAT_Delta 2 dB. Dies ergibt einen PSAT-Wert, der um 2 dB über OP1dB liegt. Hierbei handelt es sich um einen typischen Default-Wert für HF-Verstärker in GaAs-Technik.

AM/AM- und AM/PM-Verzerrung

Um einen genaueren Blick auf die simulierten Kompressions-Charakteristika zu werfen, können wir die AM/AM- und die AM/PM-Verzerrung betrachten. In Bild 3 sind die gemessenen und die simulierten Ergebnisse für den HMC930A zu sehen. Die gemessene AM/AM-Verzerrung stimmt zwar sehr gut mit der Simulation überein, aber laut Simulation gibt es keine AM/PM-Verzerrung, was nicht korrekt ist. Der Grund hierfür ist, dass das Bausteinmodell und der Datensatz ausschließlich Kleinsignal-Phaseninformationen (nämlich S21) enthalten. Der Simulator kann zwar die OP1dB- und PSAT_Delta-Daten aus dem Bausteinmodell nutzen, um die AM/AM-Verzerrung abzuschätzen, aber er verfügt über keine Großsignal-S-Parameter, mit denen er arbeiten könnte. In einem solchen Fall wäre die Verwendung eines aufwändigeren Modells wie etwa des X-Parameter-Formats angezeigt, denn X-Parameter-Modelle enthalten pegelabhängige S-Parameter.

Simulation eines Power Sweeps für einen GaN-Verstärkers

In Bild 4 ist ein Power Sweep bei 3,2 GHz für den HMC1114LP5DE dargestellt, ein 10-W-HF-Verstärker in GaN-Technik. GaN-HF-Verstärker weisen tendenziell eine deutlich sanftere Kompressionscharakteristik auf als GaAs-Bauelemente. Dies macht eine Anpassung des PSAT_Delta-Werts erforderlich, also der Differenz zwischen dem 1-dB-Kompressionspunkt und dem Sättigungspunkt. Im vorliegenden Fall wurde aufgrund von Messungen ein Delta-Wert von 7 dB gewählt. Der Simulator kann wegen des großen Delta-Werts in einigen Fällen eine Warnmeldung ausgeben, er arbeitet aber dennoch ordnungsgemäß und liefert ein Resultat, das sehr gut

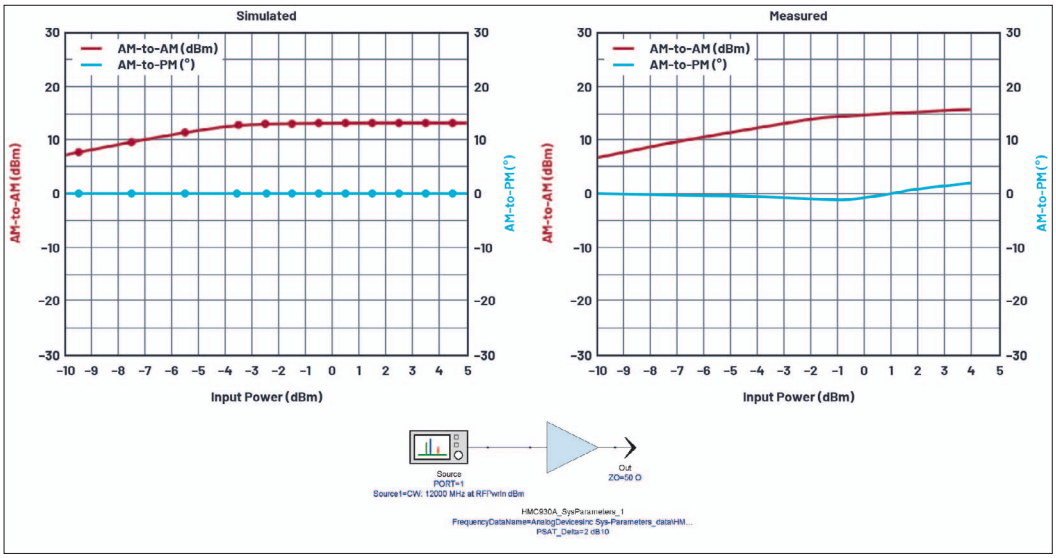


Bild 3: Simulation und Messung von AM/AM- und AM/PM-Verzerrung

mit der gemessenen Performance übereinstimmt.

ACLR-Simulation

Der Nutzen eines Sys-Parameter-Datensatzes wird größer, wenn wir von Dauerstrich-Messungen und -Simulationen abgehen und uns dem Verhalten modulierter Signale zuwenden. In den Datenblättern findet man durchaus Angaben über die Verstärkungs-, Kompressions- und IP3-Eigenschaften eines Bausteins und seine Rauschzahl. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass Datenblätter von Bauelementen, die für allgemeine Zwecke gedacht sind, Diagramme zum Verhalten mit modulierten Signalen enthalten. Hinzu kommt, dass sich Kenndaten wie ACLR und EMV ohne Simulationen oder Messungen nicht ohne Weiteres vorhersagen lassen.

Bild 5 zeigt die simulierten Ergebnisse eines Power Sweeps mit dem 0,25-W-Treiberverstärker ADL5320 bei 2,14 GHz, angesteuert mit einem 5 MHz breiten Träger. Der simulierte Träger besteht aus elf äquidistanten Unterträgern, und der ACLR-Wert wird bei einem Träger-Offset von 5 MHz gemessen.

Der Simulation ist zu entnehmen, dass der ACLR-Wert seinen optimalen Wert bei einer Eingangsleistung von -15 dBm erreicht. Unterhalb dieser Eingangsleistung verschlechtert er sich Dezibel um Dezibel mit dem Eingangspegel. Diese Region des Diagramms wird durch die Rauschzahl-Daten im Datensatz dominiert. Bei Eingangsleistungen über -15 dBm verschlechtert sich der ACLR-Wert mit einer Rate, die eng mit dem IP3-Wert des Bausteins korreliert. Beim Erstellen eines über einen weiten Leistungsbereich korrekten ACLR-Sweeps ist zu beachten, dass die Ergebnisse dieser Simulation sowohl von den Rauschzahl-Daten (bei geringer Leistung) als auch von den IP3-Daten (bei hoher Leistung) bestimmt werden.

In dem Diagramm sind auch real gemessene Daten (in blau) dargestellt. Dass nicht bei -15 dBm derselbe optimale Wert erreicht wird, liegt an den Grenzen der Messanordnung. Beachtenswert ist, dass sich der gemessene ACLR-Wert mit zunehmender Eingangsleistung schneller verschlechtert. Dies liegt daran, dass der OIP3-Wert des Bausteins mit zunehmender Eingangs- und Ausgangsleistung geringfügig schlechter wird, während er im Idealfall gleich bleiben sollte. Der IP3-Wert im Datensatz des Modells verändert sich dagegen nicht mit der Leistung und kann gewissermaßen als Kleinsignal-IP3-Wert des Bausteins betrachtet werden. Auch in diesem Fall könnte ein X-Parameter-Modell mit seiner aufwändigeren Nachbildung der Pegelabhängigkeit eine präzisere Simulation ermöglichen.

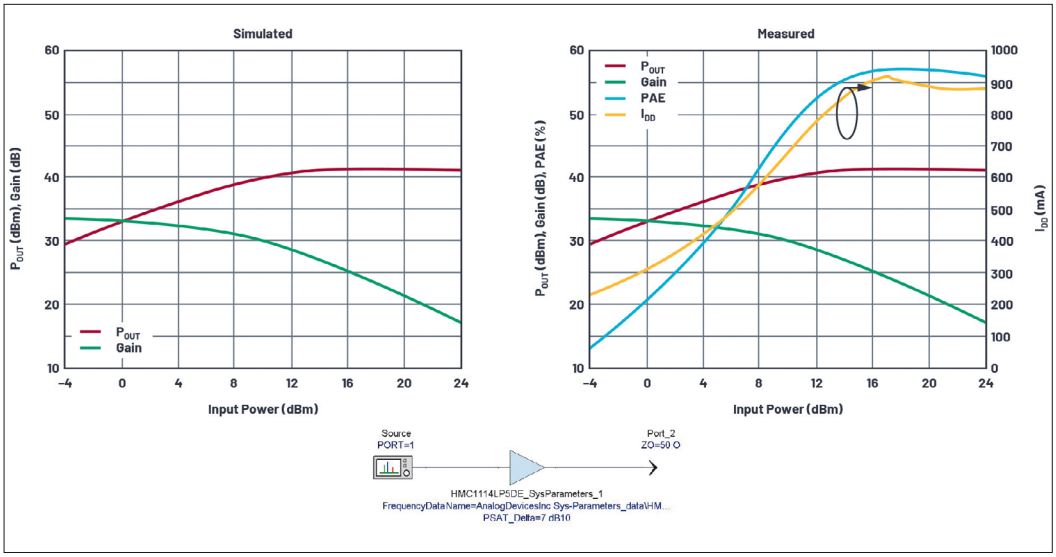


Bild 4: Simulierter und gemessener Power Sweep mit dem 10-W-GaN-Verstärker HMC1114 bei 3,2 GHz

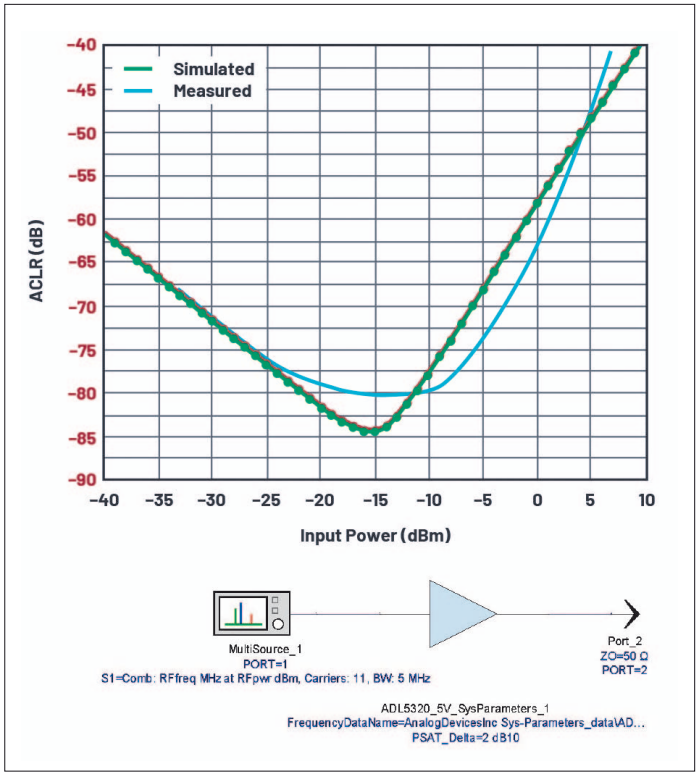


Bild 5: ACLR-Simulation

EVM-Simulation

Sys-Parameter-Modelle lassen sich auch für eine verlässliche Simulation des EVM-Werts nutzen. In Bild 6 sind die gemessenen und simulierten EVM-Resultate als Funktion der HF-Leistung dargestellt. Als Eingangssignal dient ein 16-QAM-Träger mit 1 MSPS, der hier den Gain Block ADL5602 mit einer Bandbreite von 50 MHz bis 4 GHz ansteuert. Bei hoher wie bei niedriger Leistung ist eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erkennbar.

Temperatursimulation

Der standardmäßige Sys-Parameter-Datensatz in der ADI-Bibliothek enthält nur Umgebungstemperatur-Daten. Allerdings lässt sich das Modell durch zusätzliche Tabs mit Temperaturdaten erweitern. Bild 7 zeigt den Datensatz für den 1-W-Verstärker ADPA7007 für 18 bis 44 GHz. Dieser Datensatz enthält separate Tabs mit den gleichen Verstärkungs-, Rausch- und Verzerrungsdaten, allerdings für -55, +25 und +85 °C. Die Genesys- und SystemVue-Simulatoren nutzen diese drei Datenpunkte zum Generieren interpolierter Daten bei anderen Temperaturen (in Bild 7 ebenfalls dargestellt).

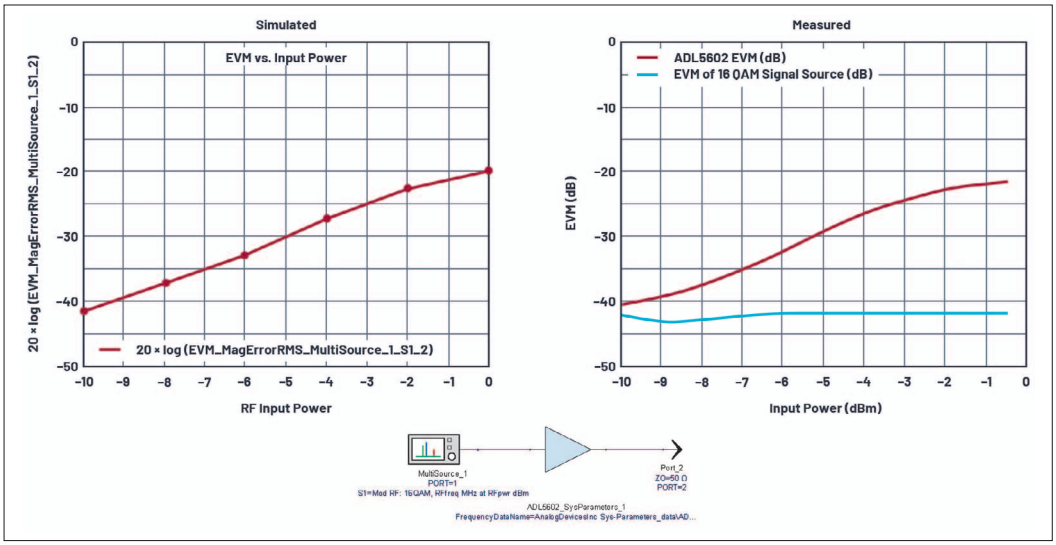


Bild 6: Simulierter und gemessener EVM-Power-Sweep mit einem breitbandigen Gain Block

Simulation in ADS

Sys-Parameter-Datensätze sind in Keysight Genesys und SystemVue nativ vorgesehen, aber in Keysight ADS funktionieren sie nicht. Es gibt allerdings eine provisorische Lösung für den Import von Sys-Parameter-Daten in ADS, mit der sich Rausch-, Verzerrungs- und Kompressions-Simulationen durchführen lassen. Man verwendet hierzu das Amplifier2-Modell, das in Keysight ADS nativ vorhanden ist und eine ähnliche Funktionalität bietet wie Sys-Parameter-Modelle.

Im Aufmacherbild ist ein ADS-Schaltplan mit dem Amplifier2-Modell zu sehen. Der Schaltplan enthält ebenfalls zwei Data-Access-Komponenten (DAC1 und DAC2), die der Zuordnung der Sys-Parameter-Daten zum Amplifier2-Modell dienen.

Die Rauschzahl-, OIP3- und OP1dB-Daten sind als Textdatei formatiert und werden dem Amplifier2-Modell mithilfe von DAC1 zugeordnet. DAC2 dient dagegen dazu, die S-Parameter-Daten dem Amplifier2-Modell zuzuordnen. Das Resultat ist ein Amplifier2-Modell in ADS, mit dem sich all die zuvor beschriebenen Simulationen auch in Keysight ADS durchführen lassen.

Bei dieser Methode ist jedoch Vorsicht geboten. Wenn HF-Power-Sweeps durchgeführt werden, während das Amplifier2-Modell weit in die Kompression getrieben wird, weicht die simulierte Performance tendenziell erheblich von den gemessenen Eigenschaften ab. Das Erstellen eines Amplifier2-Modells, das S-Parameter-Daten neben Rausch-, Verzerrungs- und Kompressionsdaten nutzt, eignet sich außerdem am besten für Bauelemente, die gute Grundwerte für den Eingangsreflexionsfaktor und den Ausgangsreflexionsfaktor (S11 und S22) aufweisen.

Dies trifft beispielsweise für die meisten HF-Verstärker von Analog Devices zu, die keine externen HF-Anpassungsbauelemente benötigen. Ein einfacheres Amplifier2-Modell lässt sich erstellen, indem man die DAC1-Komponente mit einer skalaren Verstärkung versieht und die S-Parameter-Daten (und damit DAC2) weglässt.

Zusammenfassung

Sys-Parameter-Datensätze stellen ein neues und nützliches Hilfsmittel für die Simulation von HF-Verstärkern dar. Sie sind nützlicher als S-Parameter, die weder das Rauschen noch die Verzerrung oder die Kompression modellieren. Sie sind allerdings nicht so ausgefeilt wie X-Parameter-Modelle, die das pegelabhängige Verhalten von Modellen, wie etwa den AM/PM-Verzerrung oder den ACLR-Wert verbessern können.

Sys-Parameter-Modelle besitzen jedoch eine einfache tabellarische Struktur und lassen sich einfach erstellen, indem S-Parameter-Daten mit Rauschzahl-, OIP3- und OP1dB-Daten kombiniert werden. Bei Vergleichen zwischen simulierten und gemessenen Daten zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung. In ADS können Sys-Parameter-Modelle eigentlich nicht verwendet werden, aber es gibt einen relativ einfachen Weg zum Migrieren der Datensätze mithilfe der ADS-nativen Amplifier2-Modellstruktur.

Analog Devices arbeitet stets daran, seine Bibliothek an Sys-Parameter-Modellen zu pflegen und zu erweitern. Mit dem Hinzufügen neuer Modelle zu der Bibliothek wird auch die Unterstützung für die Temperatursimulation ergänzt. Die aktuellsten Bibliotheken für Keysight Genesys und SystemVue stehen auf analog.com/sys-parameters zum Download zur Verfügung. ◄

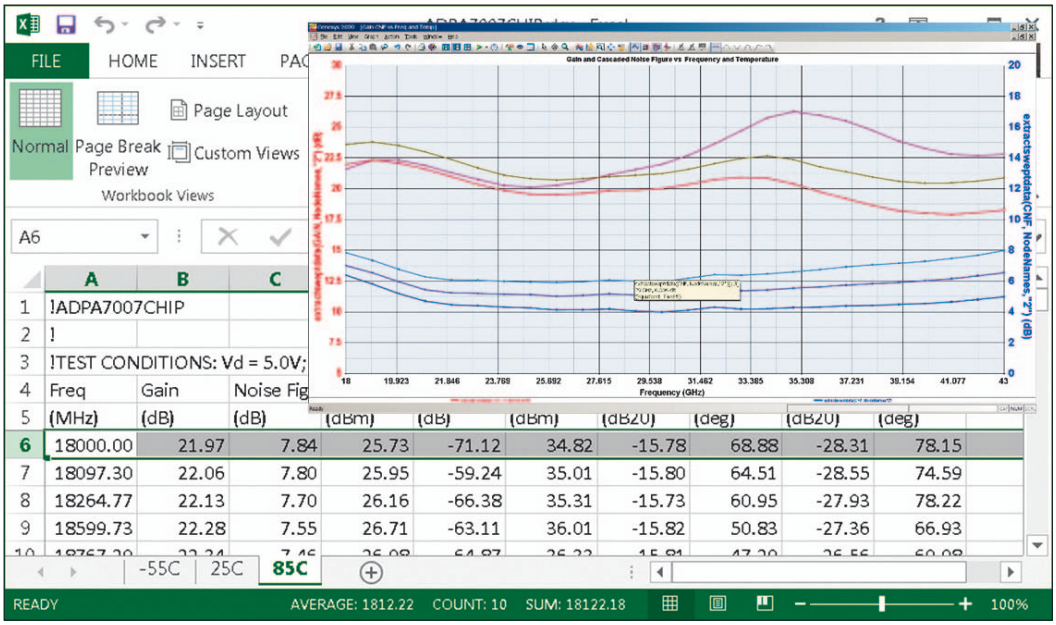


Bild 7: Simulierte Verstärkung und Rauschzahl als Funktion der Temperatur für den ADPA7007