

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 1 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

5 Nichtlineare Verzerrungen

Bei idealen Verstärkern ist das Ausgangssignal gleich dem mit einem konstanten Faktor $v > 1$ multiplizierten und um eine konstante Zeit verzögerten Eingangssignal.

Reale Verstärker weichen von diesem Idealverhalten ab, sie bewirken nichtlineare Signalverzerrungen.

Von nichtlinearen Verzerrungen spricht man, wenn sich Verstärkungsfaktor und Phasenverschiebung in *Abhängigkeit von der Amplitude des Eingangssignals* verändern.

5.1 Ursachen

Die wesentlichste Ursache sind die nichtlinearen Übertragungskennlinien von HF-Leistungstransistoren.

Dazu kommt, dass moderne Leistungsendstufen fast ausschließlich als Gegentaktschaltungen im Klasse AB-Betrieb betrieben werden, was bereits vom Prinzip her zu Verzerrungen führt.

Und schließlich verursachen bestimmte physikalische Effekte in Leistungstransistoren, zum Teil abhängig von der verwendeten Technologie, mehr oder weniger starke Verzerrungen. So ändern sich beispielsweise Impedanzen in Halbleiterstrukturen mit dem anliegenden HF-Pegel oder Kapazitäten erweisen sich als abhängig von Vorspannung und Aussteuerung

5.3 Auswirkungen

Nichtlineare Verzerrungen in HF-Leistungsverstärkern führen zur Beeinträchtigung des abgestrahlten Signals infolge von Intermodulationsverzerrungen (Intermodulation Distortions, IMD). D.h., es entstehen neue, im Originalsignal nicht vorhandene Störsignale, die als Intermodulationsprodukte (IM-Produkte) bezeichnet werden.

In welchem Maße Verzerrungen tolerierbar sind, hängt vom speziellen Anwendungsfall ab, insbesondere von der Modulationsart. Während frequenz- und phasenmodulierte Signale weitgehend immun sind gegen den schädlichen Einfluss nichtlinearer Verzerrungen, gilt dies nicht für die bandbreiteneffizienten komplexen Modulationssignale in modernen Kommunikationssystemen. Solche Signale zeigen stark schwankende Hüllkurven, das Verhältnis von maximaler zu mittlerer Signalleistung (Peak to Average Power Ratio, PAPR) kann zwischen etwa 3 und 14 dB liegen, abhängig von Modulationsart und einer Reihe weiterer Faktoren.

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 2 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

Nichtlineare Verzerrungen beeinträchtigen das Nutzsignal im Übertragungskanal, was sich in einer Verschlechterung des Bitfehlerrverhältnisses (Bit Error Ratio, BER), des Fehlervektorbetrags (Error Vector Magnitude, EVM) und als Deformation des Konstellationsdiagramms zeigt. Außerdem verursachen sie Störsignale in den Nachbarkanälen (Adjacent Channel Interference, ACI), in der Praxis auch als *Schultern* bezeichnet.

5.3 Grobe Charakterisierung

Um Aussagen über das nichtlineare Verhalten von Verstärkern zu treffen, bedient man sich einer Reihe von Kenngrößen wie 1dB-Kompressionspunkt, Intermodulationsabstand oder Interceptpoint. Mit dem Aufkommen von Vielträgersystemen und modernen Modulationsverfahren haben sich inzwischen neuere, für solche Systeme besser geeignete Kenngrößen zur Charakterisierung von Nichtlinearität hinzugesellt, wie ACPR (Adjacent Channel Interference Ratio) oder EVM (Error Vector Magnitude).

Alle diese Größen liefern aber nur ein erstes, grobes Kriterium zur Beurteilung der Verstärker-Nichtlinearität. Wie gut ein Verstärker für einen konkreten Anwendungsfall geeignet ist, muss durch *praxisnahe* Messungen und Tests geklärt werden, am besten mit den realen Signalen.

6 Verstärkern ohne und mit Memory-Effekten

Generell kann man Verstärker, wenn es um die Beschreibung und Modellierung ihres nichtlinearen Verhaltens geht, in zwei Gruppen einordnen: (1) Verstärker ohne (oder mit vernachlässigbaren) Memory-Effekten und (2) Verstärker mit Memory-Effekten.

6.1 Verstärker ohne ME, AM-AM- und AM-PM-Wandlung

Für einige Anwendungsfälle ist es ausreichend, HF-Verstärker (und andere aktive Übertragungszweitere) mathematisch und praktisch so zu behandeln, als hinge die Verzerrung des Ausgangssignals ausschließlich von der Amplitude des Eingangssignals zum Beobachtungszeitpunkt t_0 ab. Dieses Modell ist hinreichend genau für reine A-Verstärker, für Kleinsignalbetrieb und/oder für geringe Signalbandbreiten. Solche Verstärker können als frei von ME betrachtet werden (quasi-memoryless systems). Ihr nichtlineares Verhalten lässt sich durch eine einfache Polynomreihe mit komplexen Koeffizienten oder – anschaulicher – durch ihre AM-AM- und AM-PM-Charakteristik beschreiben.

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangspegel wird auch als AM-AM-Wandlung bezeichnet, die Änderung der Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom Ein-

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 3 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

gangspegel als AM-PM-Wandlung. Die zugehörigen Funktionsverläufe, auch als AM-AM- und AM-PM-Charakteristik bekannt, sind in Bild 2a und 2b schematisch dargestellt.

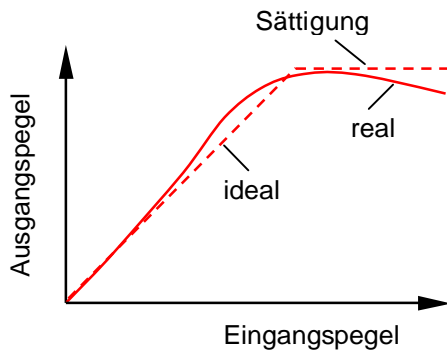


Bild 2a AM-AM-Charakteristik

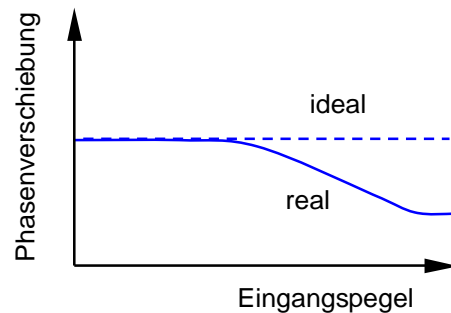


Bild 2b AM-PM-Charakteristik

Die Linearitätsentzerrung solcher Verstärker durch Vorverzerrung gestaltet sich relativ unkompliziert.

6.1 Exkurs: Signalvorverzerrung

Signalvorverzerrung (predistortion) ist ein gängiges, weithin etabliertes Entzerrungsverfahren, das nach dem in Bild 3 skizzierten Prinzip funktioniert. Das Signal durchläuft ein System mit AM-AM- und AM-PM-Kurven *invers* zu denen des Leistungsverstärkers. Wird dieser mit dem so vorverzerrten Signal angesteuert, erscheint an seinem Ausgang ein weitgehend unverzerrtes Signal.

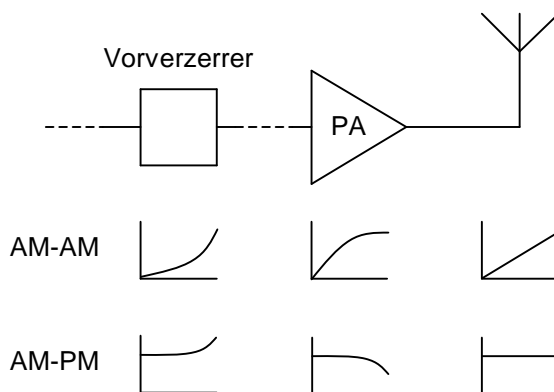


Bild 3 Prinzip der Signalvorverzerrung

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 4 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

Die technischen Realisierungen und Abwandlungen dieses Verfahrens sind vielfältig. Vorverzerrungen können analog oder digital aufgebaut sein und im Basisband, im ZF-Bereich oder im HF-Bereich arbeiten. Jede dieser Varianten hat ihre speziellen Vor- und Nachteile, die optimale Wahl wird vom jeweiligen Anwendungsfall bestimmt.

Fortschritte in der digitalen Signalverarbeitung verhelfen der *digitalen Vorverzerrung* (digital predistortion, DPD) im Basisbandbereich zu ständig wachsender Verbreitung. Die inverse Endstufencharakteristik wird hierbei im Basisband per Software mit DSPs (Digital Signal Processors), FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) oder ASICs (Application Specific Integrated Circuits) erzeugt.

Bild 4 zeigt das Prinzip. Das komplexe Eingangssignal gelangt auf einen Multiplizierer und wird dort mit komplexen Korrekturfaktoren multipliziert, die aus der AM-AM- und der AM-PM-Charakteristik des Verstärkers abgeleitet werden.

Die Korrekturfaktoren sind in Speichern als Look Up Tables (LUT) abgelegt und werden durch die Amplitude oder – (aus rechentechnischen Gründen günstiger) – das Amplitudenquadrat des Eingangssignals aufgerufen. Danach wird das digitale, vorverzerrte Signal D/A-gewandelt und in einem Quadraturmodulator in den HF-Bereich umgesetzt.

Über einen Rückkopplungspfad, bestehend aus Quadraturdemodulator, A/D-Wandler und einem Algorithmus zur permanenten Aktualisierung der LUT während des Sendebetriebs wird die Schaltung zur *adaptiven Entzerrung*.

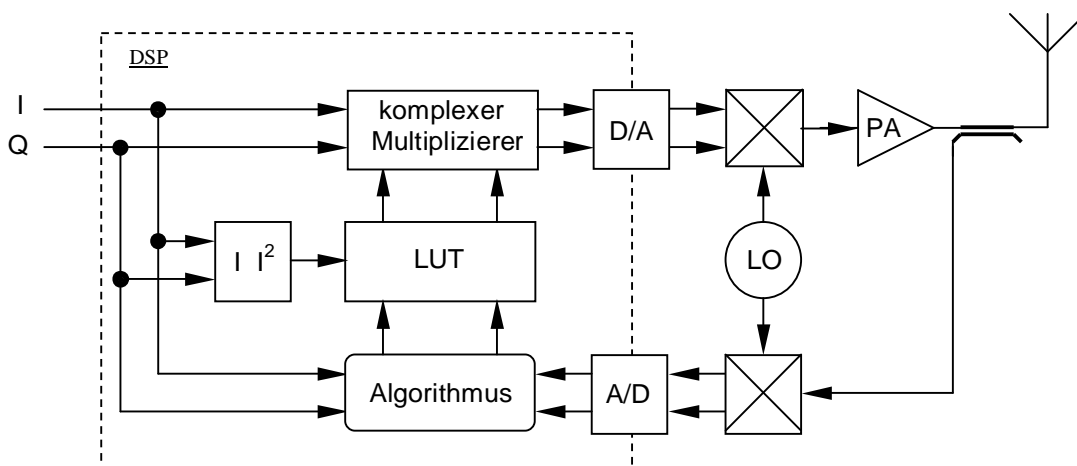


Bild 4 Prinzip einer adaptiven digitalen Vorverzerrung im Basisband

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 5 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

7 Verstärker mit Memory-Effekten

Wenn man das typische Merkmal eines Übertragungsvierpols mit Memory-Effekt in einem Satz für die Belange des Praktikers zusammenfassen sollte, dann in etwa so:

Die nichtlineareren Verzerrungen des Signals, das den Vierpol durchläuft, hängen zu einem bestimmten Beobachtungszeitpunkt t_0 nicht nur vom Wert des momentanen Eingangssignals $s(t_0)$ sondern darüber hinaus auch davon ab, welche Werte das Eingangssignal vor dem Beobachtungszeitpunkt hatte.

ME können verschiedene Ursachen haben: frequenzabhängige Impedanzen in der Betriebsspannungsabblockung, in der Vorspannungserzeugung oder in Anpassnetzwerken, wobei auch Impedanzen bei Frequenzen außerhalb der Übertragungsbandbreite, etwa im Basisband oder bei Subharmonischen, eine Rolle spielen [8], aussteuerungsabhängige Transistorkapazitäten oder signalabhängige thermische Effekte (thermal variation).

In der Literatur wird grob zwischen Kurzzeit-Memory-Effekten (μs -Bereich) und Langzeit-Memory-Effekten (ms-Bereich) unterschieden. Etwas vereinfacht ausgedrückt sind Kurzzeit-Memory-Effekte vorwiegend abblockungs-, vorspannungs- oder substratbedingt, Langzeit-Memory-Effekte sind meist thermischer Natur.

Die Verzerrungen eines Leistungsverstärkers mit ME sind nicht nur eine Funktion der Amplitude des augenblicklichen Eingangssignals, sondern hängen von einem ganzen Set weiterer Variabler ab, wie z.B. Modulationsfrequenz, schaltungsinternen Impedanzen oder Substrattemperatur.

Zur Beschreibung von Verstärkern mit ausgeprägtem Memory-Effekt ist das relativ einfache Modell der AM-AM- und AM-PM-Wandlung nicht geeignet. Solche Verstärker *verändern* während des Betriebs ihre Übertragungscharakteristiken (dynamic AM-AM, dynamic AM-PM). Anschaulich gesprochen: Aus der *einen* AM-AM-Kennlinie und der *einen* AM-PM-Kennlinie des Verstärkers ohne Memory-Effekt wird nun jeweils eine ganze Kurvenschar. Welche Kurve im jeweiligen Augenblick t_0 „gültig ist“, hängt von der Signalbeschaffenheit vor t_0 , d.h. von der Vorgeschichte, ab.

Bild 5, entnommen aus [4], zeigt dies anschaulich: die momentane (normalisierte) AM-AM-Kurve kann sich im blauen Bereich aufhalten, er umfasst die gemessenen Werte für unterschiedliche „Signalvorgeschichten“. Die grüne Kurve zeigt den Mittelwert aus allen diesen Messwerten.

Würde man einer Vorverzerrung die inverse AM-AM-Charakteristik (und die inverse AM-PM-Charakteristik, die hier nicht dargestellt ist) zu dieser grünen Kurve anziehen, wäre

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 6 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

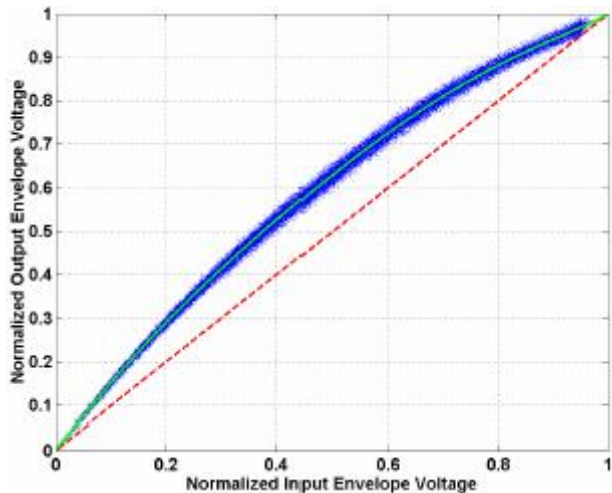


Bild 5 Dynamische AM-AM-Charakteristik eines Verstärkers mit ME (Quelle: [4])

die Entzerrung lediglich ein Kompromiss. Man hätte, wie oben formuliert, Linearität verschenkt. Eine exakte Entzerrung müsste im jeweiligen Augenblick die genau „richtige“ Kurve aus dem blauen Bereich auswählen und invers nachbilden. Ohne weiter in die Tiefe zu gehen dürfte schon rein intuitiv einsichtig sein, dass die Entzerrung für ein solches System einen erheblich größeren Komplexitätsgrad aufweist als die inverse Nachbildung statischer AM-AM- und AM-PM-Kurven.

Die mathematischen Modelle für Systeme mit ME sind recht aufwändig und sie zu verstehen und anzuwenden erfordern einen tiefen Einstieg in die Materie. Eine brauchbare Zusammenfassung verschiedener neuerer Ansätze und weiterführende Literaturangaben finden sich u.a. in [8].

8 Messung und Beurteilung von Memory-Effekten

Bevor man überhaupt an den Entwurf von Entzerrern mit ME-Kompensation oder an eine ME-Optimierung von Endverstärkern denken kann, gilt es diese Effekte zu messen und die Messungen zu interpretieren.

Die AM-AM- und AM-PM-Charakteristik eines Verstärkers liefert – wie aus der bisherigen Darstellung ersichtlich – keine brauchbare Information über Memory-Effekte.

In der Literatur sind eine Reihe von Möglichkeiten beschrieben, ME messtechnisch zu erfassen, etwa mit Hilfe von Großsignal-Netzwerkanalysen (LSNA, large signal network analyser), durch die Messung der *dynamischen* AM-AM- und AM-PM-Charakteristik (z.B.[4])

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 7 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

oder die Auswertung der Hüllkurvenverformung eines mit einem Rechteckimpuls modulierten Trägers [4], [5].

Brauchbare Aussagen liefert aber bereits eine unkomplizierte Zweiton-Messung:

Werden zwei eng benachbarte sinusförmige Träger mit den Frequenzen f_1 und f_2 auf den Eingang des Testobjekts gegeben, zeigen sich vorhandene Memory-Effekte durch zwei typische Auswirkungen auf die IM-Produkte 3. Ordnung:

1. Die *Amplitude* der Produkte zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Abstand Δf der beiden Messfrequenzen f_1 und f_2 , also von der Bandbreite des Mess-Signals, wie in Bild 6 schematisch dargestellt. Deshalb werden ME in der Literatur auch als *bandwidth-dependent distortion effects* gehandelt.

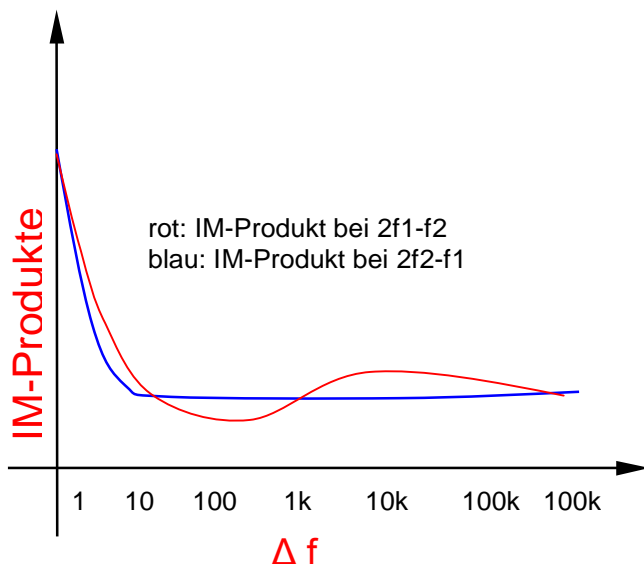


Bild 6 typische Δf -Abhängigkeit der Amplituden der IM-Produkte 3. Ordnung

2. Verstärker mit ME bewirken eine Unsymmetrie zwischen dem unteren und dem oberen IM-Produkt (*IMD-level asymmetry*).

Ein Beispiel aus [8] zeigt diese Unsymmetrie in besonders ausgeprägter Form (Bild 7). Es handelt sich um die Ergebnisse von Messungen an einem MESFET-Verstärker; der untere Ton liegt bei 1 GHz. In der Umgebung von $\Delta f=1$ kHz und $\Delta f=100$ kHz sind besonders starke ME mit resonanzartigem Verhalten zu erkennen.

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 8 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

Wenn dieser Amplitudenunterschied der beiden Produkte bei kleinen Δf , also bei niedrigen Hüllkurvenfrequenzen, auftritt, deutet dies auf einen Langzeit-Memoryeffekt hin, ausgelöst durch thermische Ursachen [8].

Noch weitergehende Einsichten gewinnt man, wenn man die Phase des unteren und oberen IM-Produkts in Abhängigkeit vom Tonabstands Δf misst. Allerdings ist der Messaufwand für eine solche Messung recht hoch. Eine in [2] beschriebene Anordnung benötigt u.a. zwei Spektrumanalysatoren und drei Signalquellen. Für erste Untersuchungen an Endstufen dürfte die einfache Zweitonmessung vorerst genügend Informationen liefern.

Um Messung der IM-Produkte in der beschriebenen Art zu interpretieren, bedarf es einiger Erfahrung.

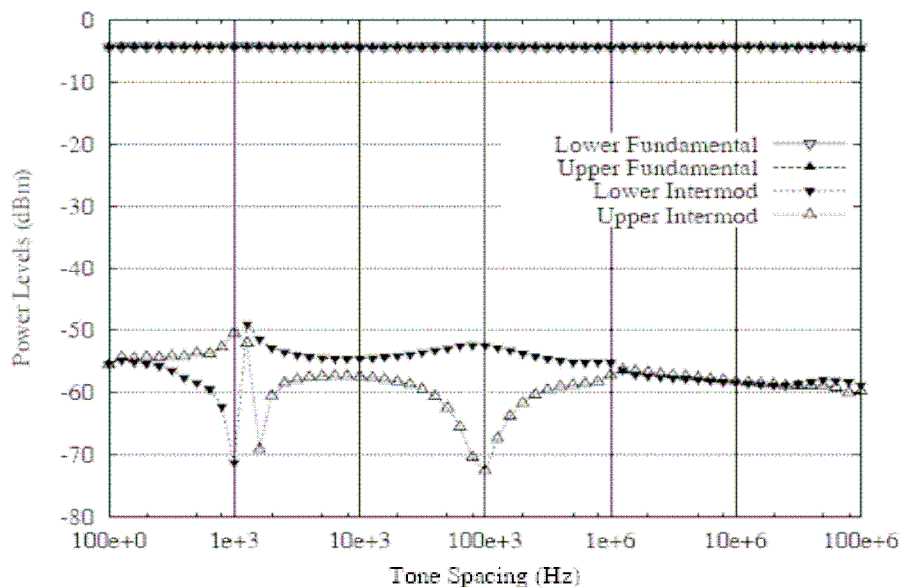


Bild 7 gemessene Δf -Abhängigkeit der Amplituden der IM-Produkte 3.Ordnung, MESFET-Verstärker bei ca. 1 GHz (Quelle. [8])

9 Zusammenfassung

Memory-Effekte begrenzen den Wirkungsgrad moderner HF-Leistungsverstärker. Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, ihren schädlichen Einfluss gering zu halten: (1) Durch die Wahl geeigneter Halbleiter sowie durch schaltungstechnische und konstruktive Maßnahmen von vorn herein Endstufen mit möglichst geringen ME zu realisieren und (2) durch Kompensationssysteme den verbleibenden ME-Anteil zu minimieren. In der Praxis wird die Lösung

(Auszug aus unserem Lehrgangsmaterial, Juni 2009, Seite 9 von 9)

Memory-Effekte in HF-Verstärkern

wahrscheinlich auf eine Kombination beider Möglichkeiten hinauslaufen. Voraussetzung für die Minimierung von ME ist eine profunde Vertrautheit mit der Materie, sowohl die Modellbildung als auch die spezielle Messtechnik betreffend und das Sammeln und Auswerten von praktischen Erfahrungen auf diesem Gebiet.

Literatur

[1] W. Bosch and G. Gatti, "Measurement and Simulation of Memory Effects in Predistortion Linearizers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 37, No. 12, December 1989, pp. 1885-1890.

[2] J. Vuolevi, J. Manninen, and T. Rahkonen, "Cancelling the memory effects in RF power amplifiers," in *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, vol. 1, (Sydney, NSW Australia), pp. 57-60, 2001.

[3] K. A. Remley, D. Schreurs, D. F. Williams, and J. Wood, "Extended NVNA bandwidth for long-term memory measurements," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, (Fort Worth, TX), pp. 1739-1742, 2004.

[4] P. Draxler, I. Langmore, T. P. Hung, and P. M. Asbeck, "Time domain characterization of power amplifiers with memory effects," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 803-806, 2003.

[6] A. Soury, E. Ngoya, and J. M. Nebus, "A new behavioral model taking into account nonlinear memory effects and transient behaviors in wideband sspas," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, (Seattle, WA), pp. 853-856, 2002.

[7] Ku, Hyunchul, and Kenney, Stevenson, "Analysis of Performance for Memoryless Predistortion Linearizers Considering Power Amplifier Memory Effects," Power Point Presentation, IEEE Topical Workshop on PA for Wireless Communications, September, 2003, San Diego, CA

[8] Brinkhoff, James, "Bandwidth-Dependent Intermodulation Distortion in FET Amplifiers," Dissertation, Department of Electronics, Division of Information and Communication Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia, 2004