HF-Leistungsverstärker werden durch intern abgeschlossene Oberwellen noch effizienter

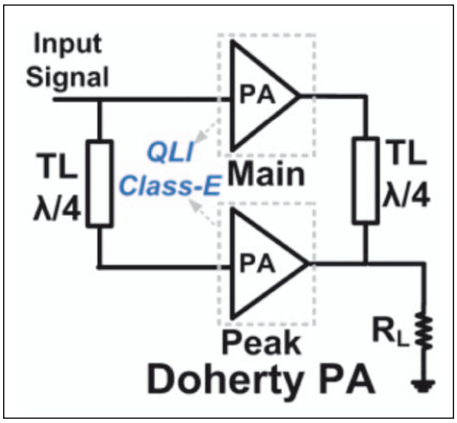

Bild 1: Vereinfachter Aufbau eines Doherty-Leistungsverstärkers

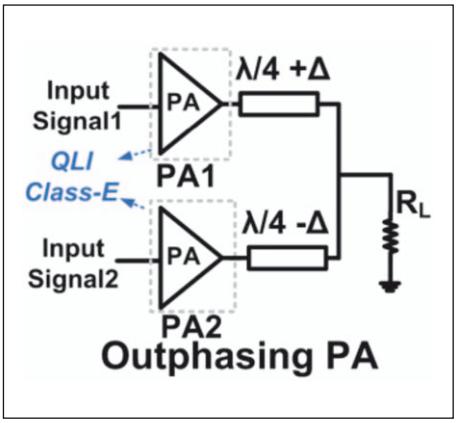

Bild 2: Vereinfachter Aufbau eines Outphasing-Leistungsverstärkers

Mobile Kommunikationssysteme mit hoher Datenrate benötigen HF-Leistungsverstärker mit einer hohen Energieeffizienz, um die Netzwerk-Betriebskosten zu verringern.

Dies ist eine Herausforderung, da die komplexen Modulationsschemata der neuen Mobilfunkstandards hohe Verhältnisse zwischen Spitzen- und Durchschnittsleistung (PAR; Peak-to-Average Power Ratio) aufweisen, die wiederum hohe durchschnittliche Wirkungsgrade der Sendeleistungsverstärker erfordern. Viele Leistungsverstärker-Architekturen weisen einen „Sweet Spot" auf, an dem sie am effizientesten arbeiten. Außerhalb dieses Bereichs sind sie weit weniger effizient. Um hohe durchschnittliche Wirkungsgrade zu erzielen müssen also Leistungsverstärker-Architekturen bereitstehen, die unter den verschiedensten Betriebsbedingungen effizient arbeiten.

Es gibt vielversprechende Ansätze zum Aufbau solcher Leistungsverstärker, die GaN-Transistoren in Doherty- und Outphasing-Architekturen verwenden. Eine noch höhere Effizienz lässt sich erzielen, wenn sich die Art, wie die höheren Harmonischen des übertragenen Signals abgeschlossen werden, wirksamer steuern lässt, ohne die Abmessungen oder Komplexität des Leistungsverstärker-Boards zu vergrößern.

Unser Ansatz verwendet harmonisch angepasste GaN-Transistoren und eine quasi-lastunempfindliche (QLI; Quasi Load-Insensitive) Architektur, um den Wirkungsgrad eines Klasse-E-Verstärkers in einem Standard-HF-Gehäuse zu erzielen. Der Ansatz sorgt für einen hocheffizienten Betrieb - trotz der Art, wie Doherty- und Outphasing-Doherty-Leistungsverstärker(PA)-Architekturen ihre Lasten modulieren.

Bild 1 zeigt eine vereinfachte Doherty-Leistungsverstärker-Architektur.

Bild 2 beschreibt eine vereinfachte Outphasing-Leistungsverstärker-(PA-)Architektur.

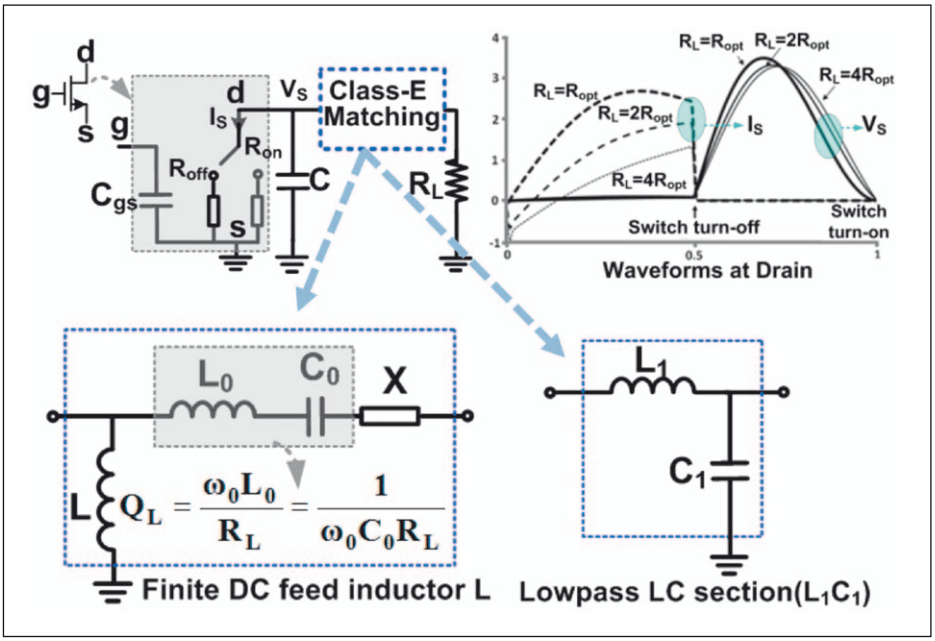

Bild 3: Der QLI-Klasse-E-Leistungsverstärker mit seiner endlichen DC-Einspeise-Induktivität L, Tiefpass-LC-Abschnitt (L1C1) und den zugehörigen Wellenformen

Abdul R Qureshi, Delft University of Technology, Ampleon und NED University of Engineering and Technology, Karachi.
Mustafa Acar und Sergio Pires, Ampleon.
Leo C N de Vreede, NED University of Engineering and Technology, Karachi, Pakistan

Ampleon
www.ampleon.com

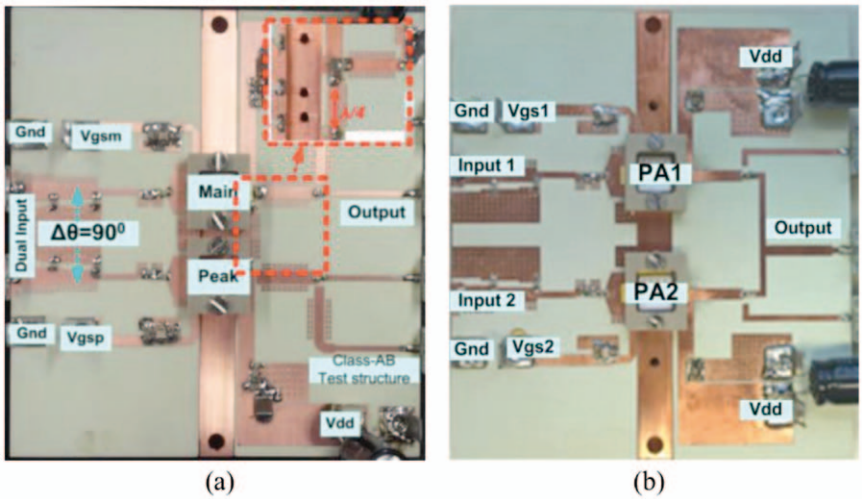

Bild 4: Prototyp eines Doherty-Leistungsverstärkers (a) und Mixed-Mode-Outphasing-Leistungsverstärkers (b)

Effizientere Leistungsverstärker durch QLI-Techniken

Wir verwenden eine Implementierung mit endlicher Induktivität eines Klasse-E-Verstärkers, um einen hohen Wirkungsgrad über eine einfache Schaltungsstruktur zu erzielen. Zahlreiche Betriebsmodi treten auf, wenn die Beziehung zwischen dem Lastnetzwerk und den Eingangsparametern als eine Funktion des Resonanzfaktors

$$q = 1/\omega\sqrt{LC}$$

über L und C variiert (Bild 3).

Bei q = 1,3 geht der Leistungsverstärker in einen Klasse-E-Betriebsmodus über, der den besten Wirkungsgrad über einen großen Bereich von Lastwiderständen bietet – wie es für Systeme erforderlich ist, die dynamische Lastmodulation nutzen.

In HF-Standardgehäusen erlauben Größen- und Kostenbeschränkungen nur einfache Anpassungsnetzwerke. Ein serieller Kondensator ist intern besonders schwierig zu implementieren. Daher haben wir eine funktionell identische transformierte Tiefpass-LC-Schaltung (L1C1) abgeleitet, die im unteren Bereich von Bild 3 dargestellt ist.

Da die höheren Harmonischen innerhalb des Gehäuses angepasst sind, ist ein herkömmliches Load-Pull-System ausreichend, um die optimale Impedanz für maximalen Wirkungsgrad, maximale Ausgangsleistung und Back-Off (z.B. 6 dB) zu erzielen. Die gemessenen Daten zeigen, dass die maximale Ausgangsleistung und Effizienz auf der reellen Achse des Smith-Diagramms des Verstärkers ausgerichtet sind. Der Spitzenwirkungsgrad bleibt erhalten, während die Ausgangsleistung bei zunehmend realer Last abnimmt. Dies zeigt, dass die Impedanz der zweiten Harmonischen, die erforderlich ist, um während der Lastmodulation einen Spitzenwirkungsgrad zu erreichen, unbeeinflusst bleibt. Diese Eigenschaft ist äußerst nützlich, um den durchschnittlichen Wirkungsgrad von Doherty- und Outphasing-Leistungsverstärkern zu steigern.

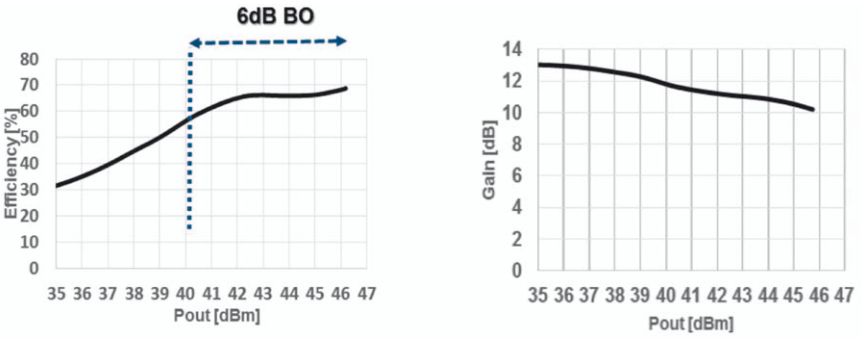

Bild 5: Statische Messung des Doherty-Leistungsverstärkers bei 25 V

QLI-Techniken für einen Doherty-Leistungsverstärker der Klasse E

Unsere Load-Pull-Messungen der Leistung und Effizienz des Bauelements in seinem Gehäuse legen nahe, dass eine interne Phasenänderung des Signals um λ/4 auftritt. Diese Phasenänderung kann bei der Auslegung des Lastnetzwerkes des Doherty-Leistungsverstärkers berücksichtigt werden, so dass keine Kompensationsleitungen am Ausgang hinzugefügt werden müssen. Die Lastimpedanz, die an den Gehäuseleitungen erforderlich ist, ist ebenfalls hoch genug, damit der Doherty-Kombinierer direkt ohne ein zusätzliches Anpassungsnetzwerk angeschlossen werden kann.

Die Tatsache, dass höhere Harmonische innerhalb des Gehäuses abgeschlossen sind, bedeutet, dass das Lastnetzwerk für den Doherty-Leistungsverstärker einfach und kompakt sein kann und keine höhere harmonische Anpassung erfordert. Darüber hinaus liegt am Hauptverstärker im Klasse-AB-Modus eine Vorspannung an, während der Spitzenverstärker im Klasse-C-Modus für Ruheströme vorgespannt ist, um einen gewöhnlichen Doherty-Betrieb sicherzustellen, so dass der Baustein bei hoher Belastung in einen Klasse-E-ähnlichen Betrieb übergeht.

QLI-Techniken für ein Dual-Input-, Mixed-Mode-Outphasing-Leistungsverstärkerdesign

Das Mixed-Mode-Outphasing-Design zeigt Bild 4b. Chireix-Kompensation wurde in die beiden Zweige integriert, indem ihre elektrische Länge um ±Δ angepasst wurde, anstatt einen Shunt-basierten Blindleitwert mit hohem Platzverbrauch hinzuzufügen. Der Wert von Δ legt den erforderlichen Kompensationswinkel für den Phasenausgleich fest.

Für einen Mixed-Mode-Outphasing-Betrieb wird eine Kombination aus Phasen- und Eingangsleistungssteuerung verwendet, um den maximalen Drain/PAE-Wirkungsgrad gegenüber dem Leistungsabfall zu erzielen.

Das Ansteuerungsprofil zum Erreichen des besten Wirkungsgrads wird in einer Nachschlagetabelle gespeichert. Dies bedeutet, dass der Outphasing-Leistungsverstärker einen starken Wirkungsgrad-/Verstärkungs-Roll-Off bei größeren Outphasing-Winkeln vermeiden kann und so seinen hohen Line-Up-Wirkungsgrad beibehält.

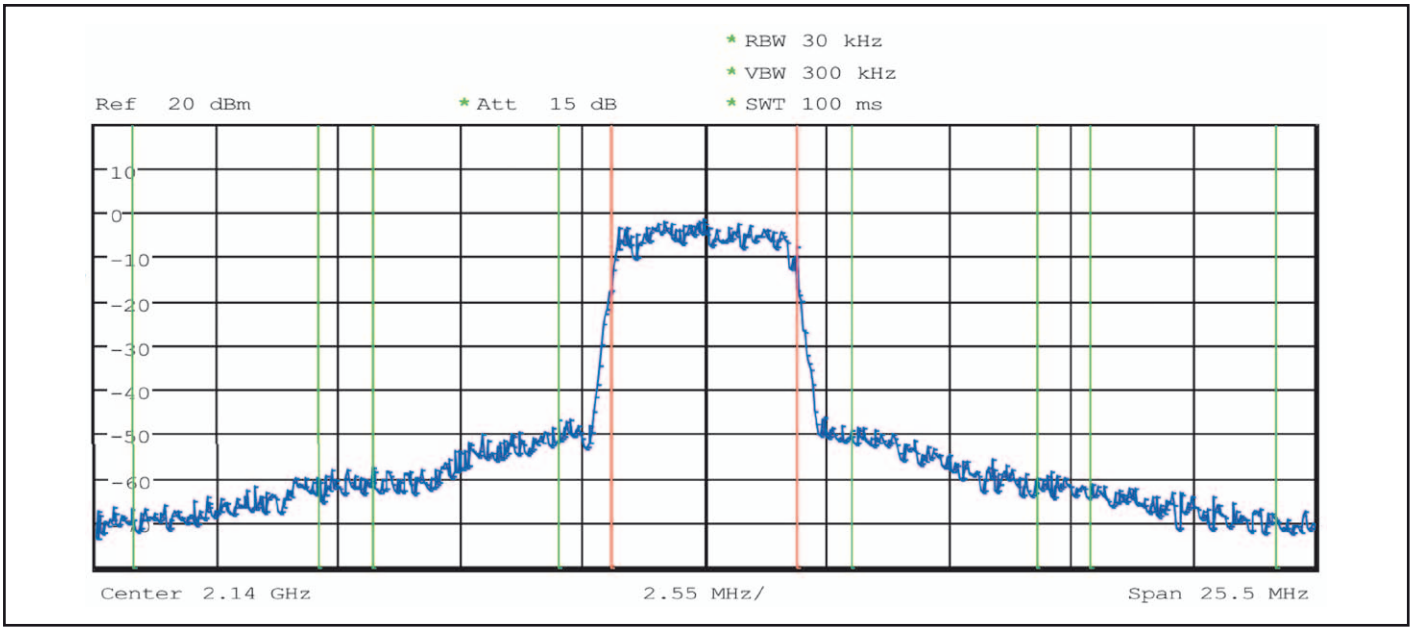

Bild 6: Dynamische Messung eines Doherty-Leistungsverstärkers mit Einträger-WCDMA bei 2,14 GHz und 7 dB PAR, nach digitaler Vorverzerrung

QLI-Leistungsverstärker in der Praxis

Wir haben diese beiden Leistungsverstärker-Architekturen mit einem Messaufbau mit zwei Eingängen getestet, der sowohl die Eingangsphase als auch die Amplitude des Signals mit einem Sweep versehen kann. Die Bauteile wurden nicht in eine hohe Kompression gezwungen, um eine Überhitzung beim Betrieb mit kontinuierlichen Signalen zu vermeiden. Die Spitzenleistung bei modulierten Signalen ist dabei um mindestens 1 dB höher als die statisch gemessene Ausgangsleistung.

Für die Linearisierung wurde ein vektorgeschalteter, allgemeiner Speicherpolynom-Ansatz verwendet. Eine optimierte digitale Vorverzerrung sollte eine noch bessere Linearisierung ermöglichen.

Die Continuous-Wave-Messungen des Doherty-Leistungsverstärkers in Bild 5 zeigen, dass bei 2,14 GHz die Spitzenausgangsleistung 46,2 dBm mit einem Wirkungsgrad von 68,79% erreicht wird, die bei 6 dB Back-Off auf über 58% gehalten wird. Bild 5 zeigt auch die Verstärkungsantwort.

Der Doherty-Leistungsverstärker wurde auch mit einem Einträger-WCDMA-Signal mit 7 dB PAR getestet. Der Test zeigte, dass der Doherty-Leistungsverstärker nach der Linearisierung einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 58,3% und eine durchschnittliche Ausgangsleistung von 40,41 dBm aufweist. Das Leistungsspektrum des Doherty-Leistungsverstärkers nach der Linearisierung ist in Bild 6 dargestellt.

Der gemessene Wirkungsgrad gegenüber der Ausgangsleistungsantwort eines Mixed-Mode-Outphasing-Leistungsverstärkers mit zwei Eingängen unter Verwendung des oben beschriebenen integrierten QLI-Klasse-E-Ansatzes ist in Bild 6 dargestellt. Der Zweig PA1 ist in Klasse-AB vorgespannt, während PA2 in Deep-Klasse-AB vorgespannt ist, um den Back-Off-Wirkungsgrad im Vergleich zu Klasse-AB-/Klasse-AB-Biasing um 3% zu verbessern. Die Farbpunkte zeigen den 2D-Sweep von Eingangsleistung und Phase. Die statischen Messergebnisse zeigen eine Spitzenausgangsleistung von 49 dBm mit einem Wirkungsgrad von 77%, der jenseits von 60 dB über 6 dB Back-Off beibehalten wird. Die endgültige optimale Antwort, die durch das Verbinden aller Punkte mit hohem Wirkungsgrad erreicht wird, zeigt eine Effizienz von mehr als 50% über einen 9dB-Back-Off-Bereich mit einer guten Verstärkung (Bild 7).

Der Mixed-Mode-Outphasing-Leistungsverstärker wurde auch mit einem Einträger-WCDMA-Signal mit 7 dB PAR getestet. Das Messergebnis zeigt, dass der durchschnittliche Wirkungsgrad dieses Leistungsverstärkers 66,6% beträgt – mit einer durchschnittlichen Ausgangsleistung von 42,68 dBm nach der Linearisierung. Das Spektrum nach der Linearisierung ist in Bild 7 dargestellt.

Fazit

Dieser Beitrag zeigt, dass es möglich ist, hocheffiziente, lastmodulationsbasierte Leistungsverstärker zu entwickeln, indem höhere Harmonische innerhalb des HF-Gehäuses abgeschlossen werden. Dieser Ansatz bedeutet auch, dass die kombinierten Netzwerke einfach und kompakt sein können. ◀

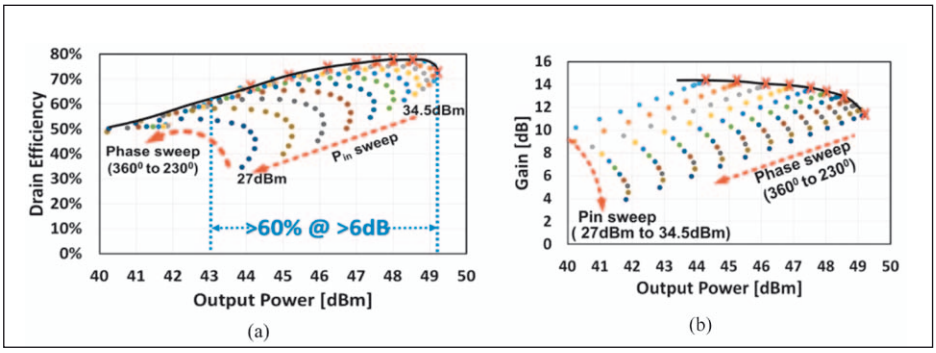

Bild 7: Statische Messung eines Mixed-Mode-Outphasing-Leistungsverstärkers im Vergleich zur Ausgangsleistung bei 28 V mit Wirkungsgrad (a) und Verstärkung (b)