HF-Praxis 2-2019 VII.pdf

Einführung in Theorie und Praxis

Doherty-Verstärker für moderne Telekom-Anwendungen

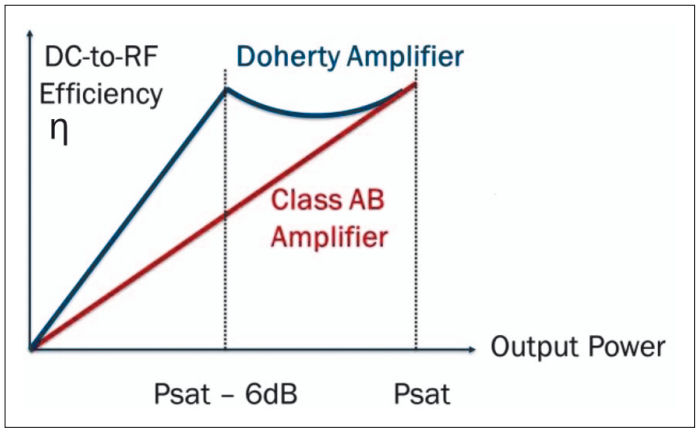

Bild 1: Träger- und Spitzenwertverstärker in einem Doherty-Verstärker sorgen für einen hohen Wirkungsgrad

Der Doherty-Verstärker, von W. H. Doherty im Jahr 1936 entwickelt und danach weitgehend ignoriert, hat sich heute zu einer Reservelösung in modernen Telekommunikationsanwendungen entwickelt, die eine hohe Ausgangsleistung und einen hohen Wirkungsgrad erfordern. Dieser Beitrag beschreibt die Theorie und ein grundlegendes Design für einen Doherty-Leistungsverstärker.

Obwohl die Bandbreite von Doherty-Leistungsverstärkern etwas begrenzt ist, können sie bei verschiedenen Leistungsstufen viel höhere Wirkungsgrade erzielen als AB-Verstärker – und das bei einem hervorragenden Verhältnis von Spitzenleistung zu Durchschnittsleistung (PAPR, Peak-to-Average Power Ratio). Basierend auf einer Mehrfachverstärker-Architektur, ist ein Doherty-Leistungsverstärker in der Lage, bei niedrigem und hohem Leistungsniveau effizient zu arbeiten. Dies ist von besonderem Vorteil bei den komplexen und dynamischen Signalen, die mit modernen Modulationstechniken erzeugt werden.

Grundaufbau

Ein dualer Doherty-Verstärker setzt sich aus einem Trägerverstärker zusammen, der als Verstärker der Klasse AB oder B vorgespannt ist, während der Spitzenwertverstärker als Klasse-C-Verstärker vorgespannt ist und nur während des halben Signalzyklus leitend ist. In abgestimmten Verstärkerkreisen entspricht der Spitzenwertverstärker einem Klasse-B-Verstärker. Die Verstärker im Doherty-Paar können ähnlich vorgespannt und unterschiedlich dimensioniert sein oder eine anpassbare Vorspannung verwenden, um den Spitzenwertverstärker nach Bedarf einzuschalten.

Im Gegensatz zu einem einzelnen Klasse-AB-Verstärker kann ein Doherty-Verstärker so ausgelegt werden, dass er bei Standard-Leistungspegeln maximalen Wirkungsgrad erzielt, während er auch dafür ausgelegt ist, den Wirkungsgrad bei Back-off-Leistungspegeln zu erhöhen.

Bild 1 zeigt: Träger- und Spitzenwertverstärker in einem Doherty-Verstärker sorgen für hohen Wirkungsgrad sowohl bei niedriger als auch bei hoher Leistung und übertreffen damit die Gesamteffizienz von AB-Leistungsverstärkern

Theorie des Doherty-Verstärkers

Ein Doherty-Verstärkerpaar arbeitet mit dem Eingangssignal, das einem Quadraturkoppler zugeführt wird, bevor es sich auf den Träger- und Spitzenwertverstärker aufteilt. Diese Funktion ermöglicht es dem Eingang, einen symmetrischen Verstärker zu emulieren und verringert die Reflexion, die auftritt, wenn der Verstärker am Eingang nicht angepasst ist. Am Ausgang des Doherty-Paares wird einer der Verstärkerausgänge einer Viertelwellen-Stichleitung zugeführt, um seine Phase um 90° anzupassen, bevor er mit dem Ausgang des anderen Verstärkers kombiniert wird. Bei der Kombination der beiden Ausgangssignalpfade im Summierungsknoten wird die Impedanz der kombinierten Ausgänge durch einen Viertelwellentransformator erhöht, um die gewünschte Ausgangsanpassung zu erzielen.

Da beide Verstärker an sich nichtlinear sind, kann das Design des Ausgangsimpedanz-Anpassungsnetzwerks sehr komplex sein, insbesondere wenn der Ausgang eine Verstärkers den Ausgang des anderen während des Betriebs einem Load-Pull unterzieht. Angesichts der nicht isolierten und nichtlinearen Ausgangssignale des Doherty-Paares ist eine hochentwickelte nichtlineare Analyse erforderlich, um das Design hinsichtlich Wirkungsgrad, Stromverbrauch und linearer Leistungsfähigkeit zu optimieren.

Es folgt eine theoretische Analyse eines linearen Doherty-Verstärkerpaares, das in Bild 2 und 3 dargestellt ist. Die Vorausset-

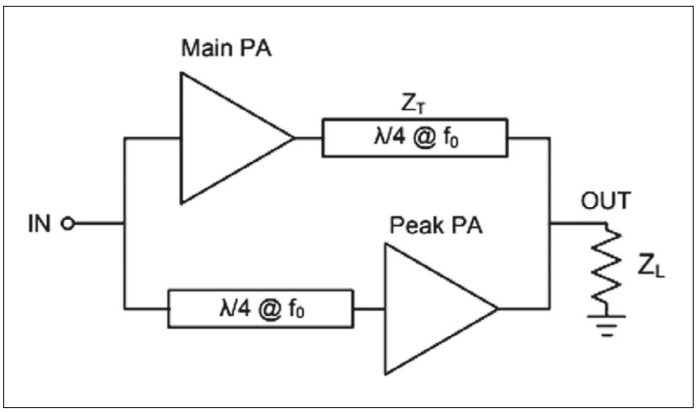

Bild 2: Ein Doherty-Verstärker besteht aus einem Träger- und Spitzenwertverstärker, zusammen mit Leistungsaufteilungs-/kombinations- und Impedanz-Anpassungskreisen, die erforderlich sind, um die Amplitude und Phase des Eingangs- und Ausgangssignals auszugleichen

Ampleon
www.ampleon.com

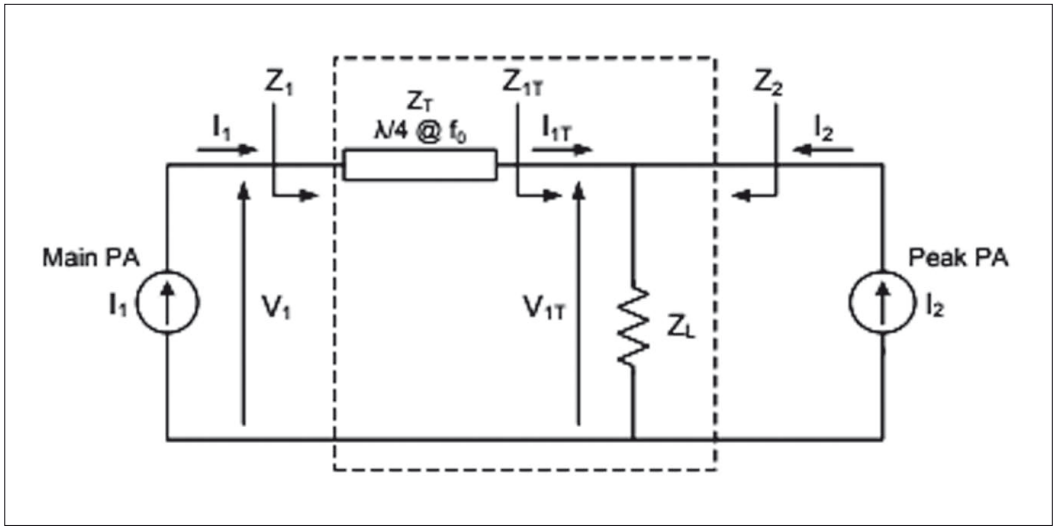

Bild 3: Ein Doherty-Verstärker lässt sich bei der Mittenfrequenz als zwei unabhängige ideale Stromquellen modellieren, wobei eine Quelle die Last durch eine Verzögerungsleitung und einen Impedanz-Anpassungskreis steuert

zungen: Beide Verstärker befinden sich im Klasse-B-Betrieb ohne parasitäre Effekte, ihre Oberwellen sind kurzgeschlossen. Sie verwenden die gleiche Drain-Source-Vorspannung und zeigen 0 V Kniespannung. Beide Verstärker werden mit Ausgangsstromkoeffizienten modelliert, die vom Treiberpegel des Verstärkers abhängen. Die Werte des Ausgangsphasen-Balancers und der Last müssen für maximale Ausgangsleistung und Effizienz um die Mittenfrequenz herum optimiert werden. Daher sollte die Impedanz des Phasen-Balancers so eingestellt werden, dass der maximale Wirkungsgrad mit dem Spitzenwertverstärker bei voller Ausgangsleistung erzielt wird. Die Ausgangsspannung des Trägerverstärkers kann für den maximalen Wirkungsgrad über den gesamten Hochleistungsbereich auf der Vorspannungsamplitude gehalten werden.

Die wichtigsten Spannungen, Ströme, Impedanzen, Leistungswerte und die Drain-Effizienz werden in diesem Beispiel mit den Gleichungen 1 bis 6 beschrieben (siehe Kasten nächste Seite). Diese theoretische Analyse hilft, die Beziehung zwischen dem Ansteuerungspegel und dem Wirkungsgrad bei der Mittenfrequenz und über der Betriebsbandbreite zu verstehen. Sie erleichtert es auch, einen Startpunkt für die Phasenausgleichs- und Impedanz-Anpassungskreise eines Doherty-Verstärkerpaares zu bestimmen. Im endgültigen Design eines Doherty-Paares muss jedoch das nichtlineare Verhalten des Verstärkers und die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Anpassungskomponenten und Verstärkern berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

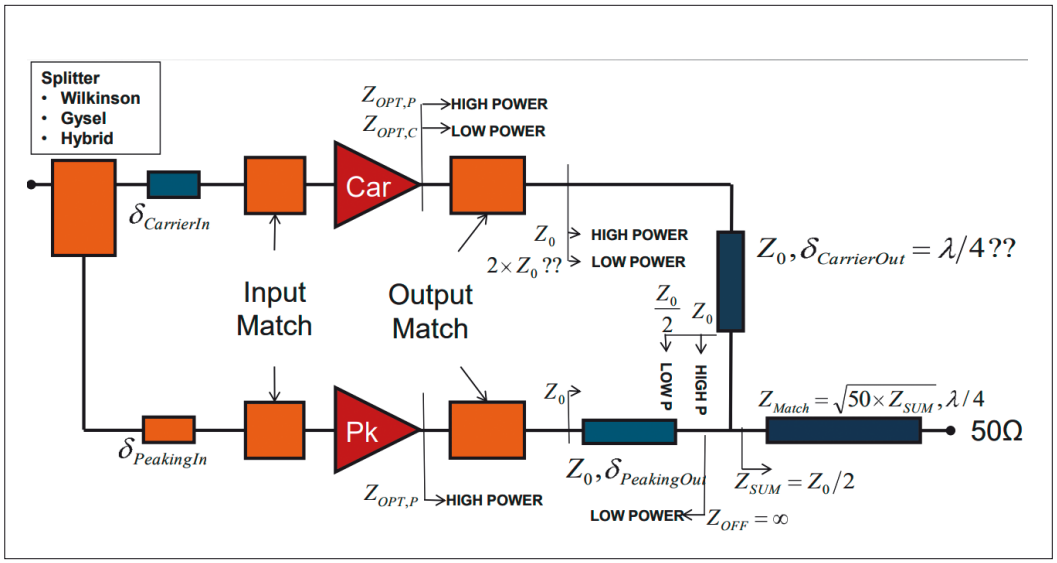

Bild 4: Ein echter Doherty-Verstärker erfordert zusätzliche Phasen- und Impedanz-Anpassungskreise, um die parasitären Effekte und Fertigungsabweichungen zu kompensieren, wie sie bei physikalischen Schaltungen üblich sind

Entwicklung eines Doherty-Verstärkers

Im Gegensatz zum idealen linearen Fall, der im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, treten in der Praxis parasitäre Effekte, Fehlanpassungen und physikalische Phänomene auf, die zusätzliche Designüberlegungen und Kompromisse erfordern. Bei der Entwicklung eines Doherty-Verstärkerpaars weist jeder Verstärker parasitäre Effekte, durch Abweichungen während der Fertigung, beim Gehäuse, bei den Interconnect-Verbindungen und Anpassungskreisen, auf sowie eine Phasenverschiebung. Die Ausgangsoffset-Leitungen für beide Verstärker sind erforderlich, wobei eine davon von 90° abweicht. Eingangsoffset-Leitungen sind erforderlich, um die Phasen an den Ausgängen anzupassen. Eine Ausgangsanpassung ist erforderlich, die mit der charakteristischen Impedanz der Last übereinstimmt. Designentscheidungen müssen getroffen werden, da eine Impedanz- und Phasenanpassung nicht bei allen Frequenz- und Leistungspegeln während des Betriebs erzielt werden kann.

Das resultierende Diagramm in Bild 4 enthält die komplexe Impedanz- und Phasenanpassungsschaltung, die in der Praxis für Doherty-Verstärker zum Einsatz kommt. Das folgende Verfahren beschreibt das Design jeder Komponente in einem Doherty-Verstärkerpaar, wobei der Trägerverstärker der Klasse AB und der Spitzenwertverstärker der Klasse C entspricht.

Schritt 1: Optimale Impedanzen auswählen

Aufgrund der Load-Pull-Eigenschaften des Doherty-Verstärkerpaares sollte die gewünschte Ausgangsimpedanz des Trägerverstärkers mit dem Lastwiderstand übereinstimmen, um einen optimalen Wirkungsgrad zu erzielen. Bei niedriger Lei-

$$(1)\quad I_1=\xi\frac{I_{max1}}{2},\ I_2=\begin{cases}0 & 0\le\xi\le\xi_b\\ \frac{I_{max1}}{2}\frac{\xi-\xi_b}{\xi_b}e^{-j\theta} & \xi_b<\xi\le 1\end{cases}$$

$$(2)\quad V_1=Z_{11}I_1+Z_{12}I_2,\ V_{1T}=Z_{21}I_1+Z_{22}I_2$$

$$(3)\quad Z=\begin{bmatrix} Z_T\frac{Z_L\cos\theta+jZ_T\sin\theta}{Z_T\cos\theta+jZ_L\sin\theta} & \frac{Z_TZ_L}{Z_T\cos\theta+jZ_L\sin\theta}\\ \frac{Z_TZ_L}{Z_T\cos\theta+jZ_L\sin\theta} & \frac{Z_TZ_L\cos\theta}{Z_T\cos\theta+jZ_L\sin\theta}\end{bmatrix}\quad where\ Z_L=\xi_bZ_T$$

$$(4)\quad V_1=\frac{I_{max2}}{2}Z_T\xi\left(\frac{Z_T}{Z_L}-\frac{1}{\xi_b}\right)+\frac{I_{max1}}{2}Z_T,\ where\ I_2\neq 0$$

$$choosing\ Z_L=\xi_bZ_T,\ V_1=V_{ds}=Z_T\frac{I_{max1}}{2}\ \ where\ drive\ levels\ \xi\ge\xi_b$$

$$(5)\quad P_{out}=\frac{|V_{1T}|^2}{2Z_L}=\frac{Z_T|I_1|^2}{2\xi_b},\ P_{DC}=\frac{2V_{ds}(|I_1|+|I_2|)}{\pi}$$

$$(6)\quad \eta=\frac{P_{out}}{P_{DC}}=\frac{\pi R_{opt}|I_1|^2}{4V_{ds}\xi_b(|I_1|+|I_2|)}$$

ξ is the drive level

ξ_b is the drive level at the onset of the Peak Amplifier

I_{max1} is the maximum current of the main amplifier

θ is the phase difference $f_d\frac{\pi}{2}$

$f_d=\frac{f}{f_0}$, where the frequency is normalized to the center frequency

V_{ds} is the drain source bias voltage at full power

η is the drain efficiency

stung sollte die Impedanz des Trägerkreises auf das Zweifache des Lastwiderstands übergehen. Da dies ein eher komplexer Vorgang ist, der vom nichtlinearen Verhalten abhängt, sind gemessene oder genau simulierte Lastkennlinien notwendig, um die maximale Ausgangsleistung unter verschiedenen Lastbedingungen zu bestimmen. Erreicht der Verstärker die volle Komprimierung, können Lastlinien helfen, die optimale Impedanz zu bestimmen, indem ein Punkt mit der besten Verstärkung und Leistungseffizienz ausgewählt wird. Die Zielimpedanz des Trägerkreises kann durch Subtrahieren von 3 dB vom Leistungsmaximum am Ausgang und Überlagern eines SWR-Kreises mit dem Wert zwei, der am optimalen Impedanzpunkt zentriert ist, ausgewählt werden. Der beste Bereich für die Verstärkung und den Wirkungsgrad ergibt sich dann innerhalb des markierten Bereichs.

Schritt 2: Z_{sum} auswählen

Die summierte Impedanz (Z_{sum}) am Ausgang des Doherty-Verstärkerpaars vor dem Ausgangsimpedanz-Anpassungskreis beträgt die Hälfte der charakteristischen Impedanz der Ausgangsübertragungs-Leitung. Beträgt die summierte Impedanz am Ausgang 50 Ohm, ist ein Ausgangsimpedanz-Anpassungskreis nicht notwendig. Dann muss aber die charakteristische Impedanz der Verstärkerübertragungsleitungen 100 Ohm betragen. Weicht Z_{sum} der Verstärkerausgänge von der Ausgangsimpedanz ab, muss ein Impedanz-Anpassungskreis am Ausgang entworfen werden, um die maximale Ausgangsleistung und Effizienz über dem gewünschten Frequenzbereich zu kompensieren.

Schritt 3: Anpassung des Ausgangs

Sowohl der Träger- als auch der Spitzenwertverstärker erfordern einen Ausgangsimpedanz-Anpassungskreis, der die gewählte optimale Impedanz in die charakteristische Impedanz der Übertragungsleitung umwandelt, welche die Verzögerungsleitungen und die Ausgangslastimpedanz-Anpassung speist. Die Anpassung des Verstärkerausgangs sollte für Träger- und Spitzenwertverstärker in etwa gleich sein.

Schritt 4: Anpassung des Eingangs

Zusätzlich ist ein Impedanz-Anpassungskreis am Eingang jedes Verstärkers erforderlich, um die Impedanz der Übertragungsleitung zwischen den Eingangsverzögerungsleitungen und dem Eingangsleistungsteiler anzupassen. Der Eingangsimpedanz-Anpassungskreis wird in dieser Phase des Designs oft identisch ausgelegt. Dies ist jedoch kein optimales Design. Der Eingangsimpedanz-Anpassungskreis des Spitzenwertverstärkers wird daher oft in der letzten Feineinstellung des Designs angepasst.

Schritt 5: Design der Trägerverstärker-Ausgangsverzögerungsleitung

Die Ausgangsverzögerungsleitung des Trägerverstärkers muss so ausgelegt sein, dass sie der charakteristischen Impedanz der Ausgangsübertragungsleitung entspricht. Bei geringer Leistung muss die Ausgangsverzögerungsleitung die optimale Trägerimpedanz aufweisen, wenn sie mit der Hälfte der charakteristischen Impedanz abgeschlossen ist. Die Leitung muss dabei möglicherweise auf eine andere Phasenverzögerung als 90° eingestellt werden. Die erforderliche Phasenverschiebung legt dies fest, um sowohl dem Spitzenwert- als auch Trägerverstärkerausgang zu entsprechen.

Schritt 6: Design der Spitzenwertverstärker-Ausgangsverzögerungsleitung

Da der Spitzenwertverstärker nur während des Hochleistungsbetriebs aktiv ist, muss dessen Ausgangsverzögerungsleitung eine sehr hohe Impedanz im Low-Power-Modus und eine Anpassungsimpedanz zur optimalen Spitzenwertverstärkerimpedanz während eines Hochleistungsbetriebs darstellen.

Schritt 7: Design der Eingangsverzögerungsleitungen und des Splitters

Sowohl der Träger- als auch der Spitzenwertverstärker benötigen eine Eingangsverzögerungsleitung, die die Phase des Signals so einstellt, dass die Ausgänge des Träger- und Spitzenverstärkers am Summierknoten in Phase sind. Ein Leistungsteiler am Eingang teilt die Leistung zwischen den zwei Verstärkern mit minimaler Einfügungsdämpfung auf. Sind die Eingangsimpedanz-Anpassungskreise richtig ausgelegt sind, sollte eine minimale Impedanz-Abweichung zwischen den Eingängen der Verstärker und dem Ausgang des Leistungsteilers vorliegen. Damit minimieren sich die Fehlanpassungsverluste. Der Leistungsteiler und die Verzögerungsleitungen müssen so ausgelegt sein, dass sie den gewünschten Betriebsfrequenzbereich berücksichtigen.

Fazit

Da Doherty-Verstärker mit Leistungstransistoren aus Silizium (Si), Galliumarsenid (GaAs) oder Galliumnitrid (GaN) hergestellt und für hochleistungsfähige und effiziente Verstärker bevorzugt werden, ist die Theorie und Praxis dieser Verstärker hilfreich für Entwickler und Techniker im HF- und Mikrowellenbereich. Damit lassen sich verbesserte Systeme bereitstellen, die den höheren Wirkungsgrad dieser Verstärker nutzen können. Da die Forderung nach mehr Effizienz gerade mit steigender Frequenz zunimmt, werden Doherty-Verstärker in komplexen Breitbanddesigns und weiterhin im Millimeterwellenbereich für kommende 5G-Anwendungen und Sende/Empfangs-Module verwendet. ◄