

RF- und Mikrowellen-Transformatoren, Teil 1

Dieser Anwendungsbericht soll die Grundlagen von RF- und Mikrowellentransformatoren erläutern und Richtlinien zur Auswahl eines Transformators für bestimmte Anwendungen geben. Der Bericht beschränkt sich auf Kern- und Draht- sowie LTCC-Transformatoren.

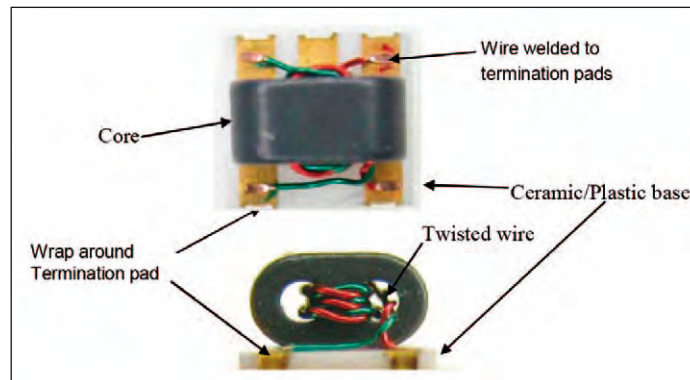


Bild 1: Transformatoren auf binokularem Kern mit offenem Gehäuse

Was ist ein Transformator?

Ein Transformator ist ein passives Bauelement, das eine gegebene Impedanz, Spannung, oder einen Strom in einen anderen Sollwert umwandelt. Zusätzlich kann der Transformator auch Gleichstromisolierung, Gleichtaktunterdrückung und Umwandlung von symmetrischen Impedanzen in unsymmetrische bewirken oder umgekehrt. Transformatoren gibt es in einer Vielfalt von Ausführungen; unser Schwerpunkt liegt hier auf Transformatoren für RF- und Mikrowellenanwendungen.

Im Grunde genommen besteht ein RF-Transformator aus zwei oder mehr Windungen die durch ein magnetisches Feld miteinander verbunden sind. Wenn nur eine Wicklung vorhanden ist, an der eine Wechselspannung liegt, wird ein sich ändernder magnetischer Fluss erzeugt. Die Amplitude des magnetischen Flusses hängt vom fließenden Strom und der Anzahl der Windungen ab. Der gemeinsame Fluss, der mit der Sekundärwicklung verbunden ist, induziert in ihr eine Spannung, deren Amplitude abhängig ist von der Anzahl der Windungen in der Sekundärwicklung. Je nach Windungszahl kann eine gewünschte Erhöhung oder Absenkung von Spannungen, Strömen oder Impedanzen realisiert werden.

Wozu sind Transformatoren erforderlich?

Transformatoren werden in folgenden Anwendungen benötigt:

- Impedanzanpassung; sie sollen den maximalen Leistungstransfer zwischen zwei Bauelementen ermöglichen.
- Aufwärts- oder Abwärtstransformation von Spannung oder Strom
- Gleichstromisolierung zwischen Schaltungsstufen bei gleichzeitiger wirkungsvoller Wechselstromübertragung.
- Interface zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Schaltungen; beispielsweise bei Gegentaktverstärkern, oder ICs mit symmetrischen Eingängen, so wie es bei A/D-Wandlern der Fall ist.
- Gleichtaktunterdrückung in symmetrischen Architekturen

Wie sind Transformatoren aufgebaut?

Ein RF-Transformator enthält normalerweise zwei oder mehr zusammengedrehte, isolierte Kupferlackdrähte, die um einen Kern oder durch Löcher im Kern, sei er magnetisch oder unmagnetisch gewickelt werden. Je nach Entwurfs- und Leistungsanforderungen kann der Kern binokular sein, wie in Bild 1, eine Ringkernspule wie in Bild 2 usw. Die

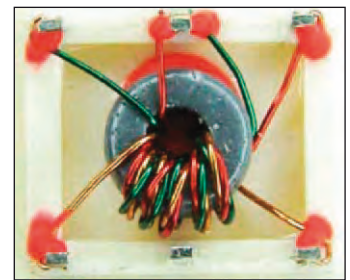


Bild 2: Ringkern

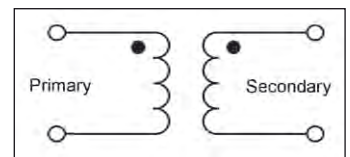


Bild 3: Transformator-Ersatzschaltbild

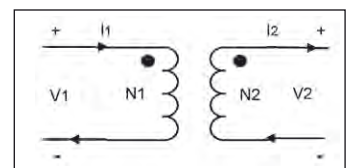


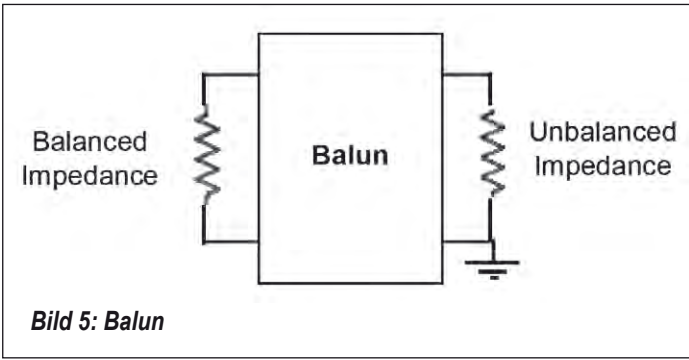
Bild 4: Transformator, der die Punktconvention in Bezug auf Spannung und Stromrichtung anzeigt

Enddrähte der Wicklungen werden an entsprechende isolierte Anschlusspunkte geschweißt oder gelötet. Die Kern- und Drahtanordnung wird in einem Plastik-, Keramik- oder Metallgehäuse untergebracht.

Der ideale Transformator

Bei niedrigen Frequenzen erzeugt ein Wechselstrom, der an einer Primärwicklung liegt, einen zeitvariablen magnetischen Fluss. Er induziert eine Spannung in einer anderen Wicklung (sekundär). Bei hohen Frequenzen bilden die Kapazitäten zwischen den Windungen und die Induktivität des Drahts eine Übertragungsleitung, die dafür sorgt, dass sich eine elektromagnetische Welle von der Primär- zur Sekundärwicklung ausbreitet. Die Kombination aus magnetischer Kopplung und

Unter Verwendung der Applikationsschrift AN 20-002 Mini-Circuits www.minicircuits.com



Übertragungsleitungs-Ausbreitung sorgt dafür, dass der Transformator außerordentlich große Betriebsbandbreiten erreicht (1:100000 oder mehr). Bild 3 zeigt die ideale Schaltung eines vereinfachten Transformators mit zwei Windungen.

Punktkonvention des idealen Transformators

Wenn am gepunkteten Ende der Primärwicklung die Spannung positiv in Bezug auf das nicht gepunktete Ende ist, dann ist die Spannung am gepunkteten Ende der Sekundärwicklung auch positiv in Bezug auf das nicht gepunktete Ende, wie Bild 4 zeigt.

Wenn der Primärstrom in das gepunktete Ende der Primärwicklung fließt, fließt Strom aus dem gepunkteten Ende der Sekundärwicklung heraus. Wenn man bei niedrigen Frequenzen die kleine Einfügungsphase vernachlässigt, dann sind die Ströme I_1 und I_2 in Phase. In Bild 4 sind N_1 und N_2 die Anzahl der Windungen und V_1 und V_2 die Spannungen an der Primär- und der Sekundärseite.

Transformatorgleichungen

Für einen idealen Transformator gelten folgende Gleichungen:

$$n = N_2/N_1$$

$$V_2 = n \times V_1$$

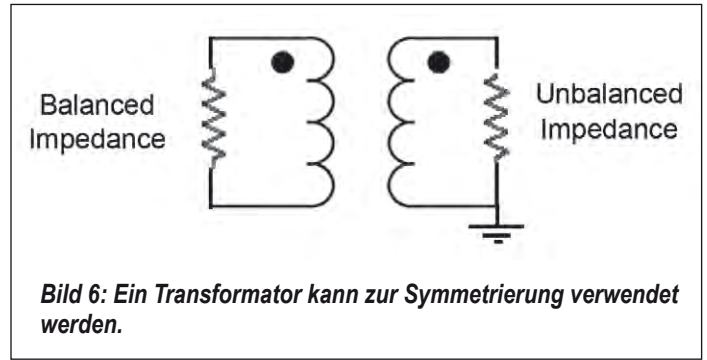
$$I_2 = I_1/n$$

$$Z_2 = n_2 \times Z_1$$

Faradays Gesetz der Induktion besagt, dass die einer Spule induzierte Spannung V der Änderung des magnetischen Flusses $N\Phi$ gleich ist in bezug auf den zeitlichen Verlauf. Auf dieser Grundlage wurden die Transformatorgleichungen abgeleitet.

Sie geben an, dass sich die Amplitude der Ausgangsspannung aus der Multiplikation des Windungszahlverhältnisses mit der Eingangsspannung V_1 ergibt. Es besagt auch, dass der Ausgangsstrom I_2 sich aus dem Eingangsstrom ergibt, wenn man ihn durch das Windungszahlverhältnis dividiert und man die Ausgangsimpedanz Z_2 erhält, wenn man die Eingangsimpedanz Z_1 mit dem Quadrat des Windungszahlverhältnisses multipliziert.

Zum Beispiel:



Es sei $n = 2$ und $Z_1 = 50$ Ohm. Dann ergibt sich:

$$V_2 = 2 V_1$$

$$I_2 = I_1/2$$

$$Z_2 = 4 Z_1 = 200 \text{ Ohm.}$$

Was ist ein Balun?

Bevor wir definieren, was ein Balun ist, müssen wir unsymmetrische und symmetrische Impedanzen definieren. Bei einer symmetrischen Zweipolimpedanz ist keines seiner Terminals geerdet, während eine unsymmetrische Impedanz eine Verbindung mit Masse hat (Bild 5). Per Definition ist ein Balun, auch Symmetriertransformator genannt, eine Vorrichtung, die symmetrische Impedanzen in unsymmetrische und umgekehrt umwandelt. Zusätzlich können Baluns Impedanztransformationen ausführen, daher auch der Name Balun-Transformator. Die meisten Transformatoren können als Symmetriertransformatoren benutzt werden, wie das Beispiel in Bild 6 zeigt.

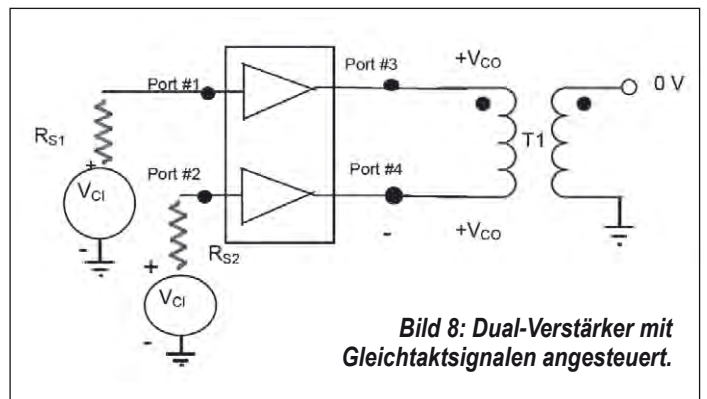
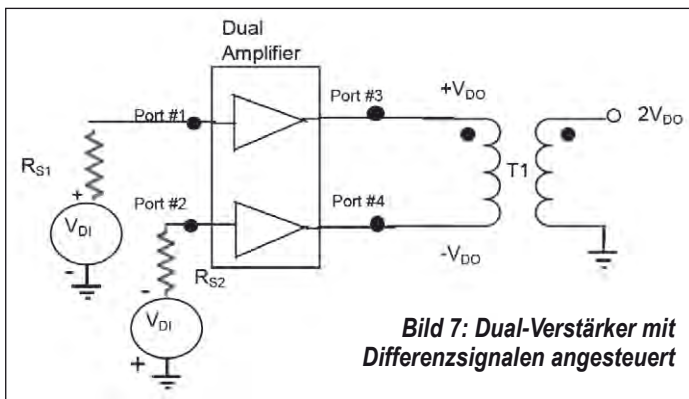
Gleichtaktunterdrückung

Eine der gebräuchlichsten Anwendungen von Baluns

besteht darin, sie zur Gleichtaktunterdrückung einzusetzen. Um die Gleichtaktunterdrückungseigenschaften eines Baluns zu demonstrieren, wollen wir als Beispiel einen zweistufigen Verstärker in Kaskade mit einem 1:1-Balun verwenden. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass die S-Parameter der beiden Verstärker identisch sind und der Balun ideales Verhalten zeigt.

Wenn zwei Signale VDI von gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Polarität (Differenzsignale) an die beiden Verstärkereingänge gelegt werden, dann werden sie verstärkt und erscheinen wieder als zwei Signale gleicher Größe (VDO) aber unterschiedlicher Polarität am Ausgang, wie Bild 7 zeigt. Sie werden in T1 (Balun 1:1) kombiniert und ergeben ein Signal der Amplitude 2 VDO.

Wenn zwei Signale gleicher Amplitude und gleicher Polarität (Gleichtaktsignale) an die Eingänge eines Dual-Verstärkers gelegt werden, werden sie verstärkt und erscheinen am Ausgang als zwei Signale gleicher Amplitude (VCO) und gleicher Polarität (siehe Bild 8). Diese



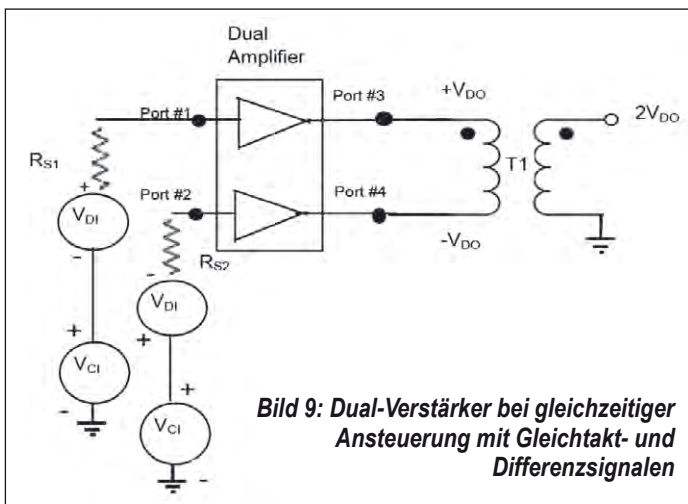


Bild 9: Dual-Verstärker bei gleichzeitiger Ansteuerung mit Gleichtakt- und Differenzsignalen

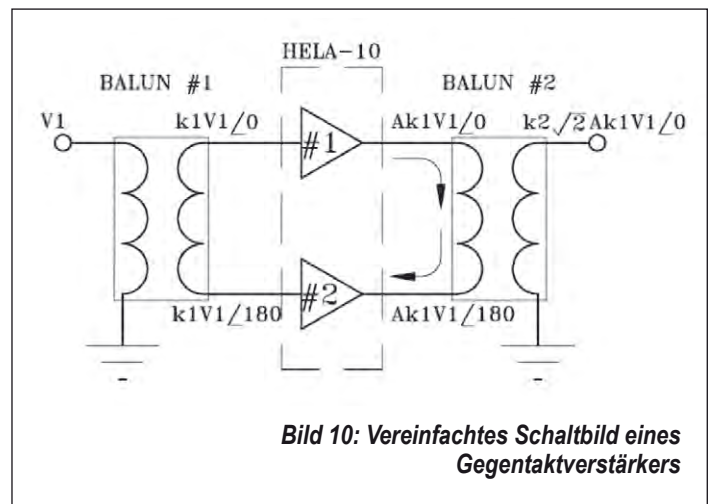


Bild 10: Vereinfachtes Schaltbild eines Gegentaktverstärkers

Signale werden in Balun T1 kombiniert, wo sie sich auslöschten und sich ein Ausgangssignal der Größe 0 V am Ausgang von T1 ergibt.

Gleichtaktsignal zu unterdrücken und die Differenzsignale zu kombinieren.

Im wirklichen Leben werden sowohl unerwünschte Gleichtaktsignale als auch gewollte Differenzsignale am Eingang des Dual-Verstärkers anliegen, wie Bild 9 zeigt. Der Symmetriertransformator bewältigt hier hervorragend die Aufgabe, das

Um die Vorteile der Gleichtaktunterdrückung in einem Symmetriertransformator zu erläutern, sehen wir uns ein PC-Board mit unsymmetrischen Baugruppen (z.B. Verstärker, Mischer usw.) an, die mit ungeschirmten Übertragungsleitungen wie Microstrip verbunden sind, sowie ein PC-Board, bei dem

symmetrische Bauelemente mit ungeschirmter Übertragungsleitung verbunden sind.

Im ersten Fall wird jedes im Band interferierende Signal, wie z.B. Störstrahlungen von einer benachbarten Schaltung, zum gewünschten Signal hinzugefügt, wobei es keine Möglichkeit gibt, das gewünschte vom unerwünschten Signal zu trennen. Dies führt zu einer Verschlechterung der Systemeigenschaften

wie z.B. des Signal/Rauschabstands. Im zweiten Fall liegt das Störsignal auf beiden Leitungen gleichzeitig, die zu den Eingängen des symmetrischen Verstärkers führen, wobei die Signale wegen der räumlichen Nähe, die gleiche Amplitude haben.

Wird das Ausgangssignal einer solchen symmetrischen Einheit durch einen Symmetriertransformator in ein unsymmetrisches Signal umgewandelt, wird das

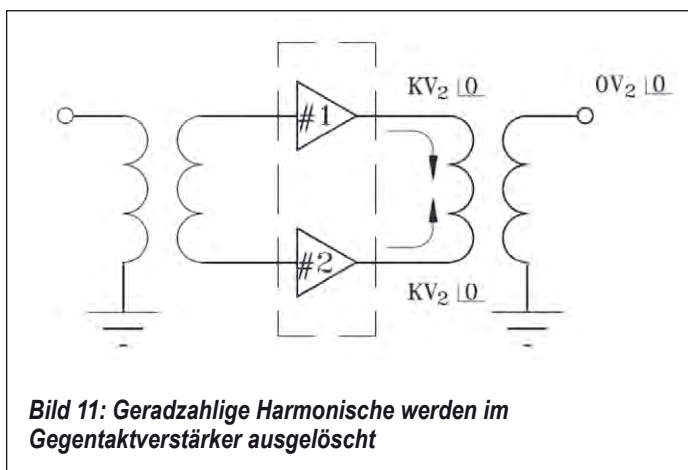


Bild 11: Geradzahlige Harmonische werden im Gegentaktverstärker ausgelöscht

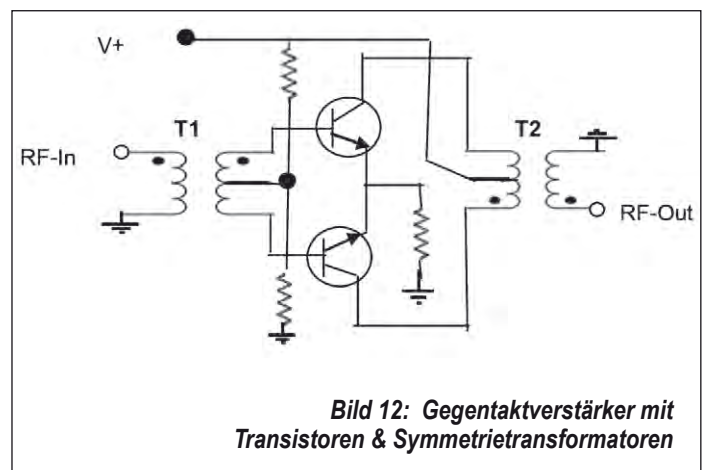


Bild 12: Gegentaktverstärker mit Transistoren & Symmetrietransformatoren

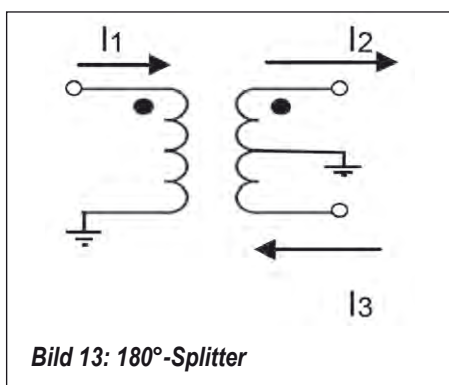


Bild 13: 180°-Splitter

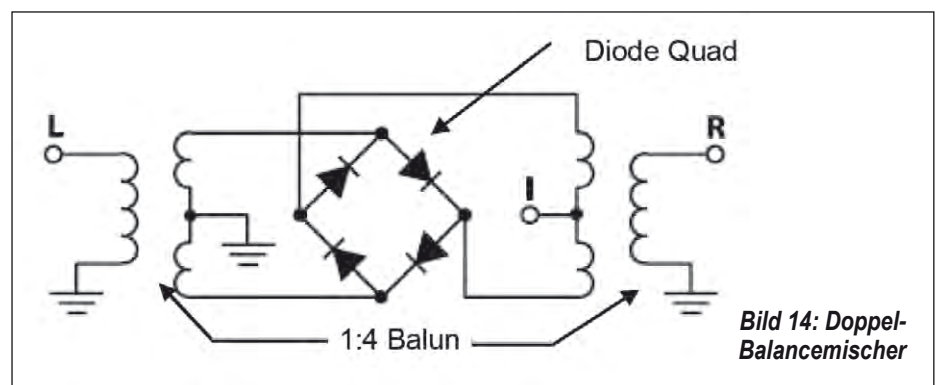
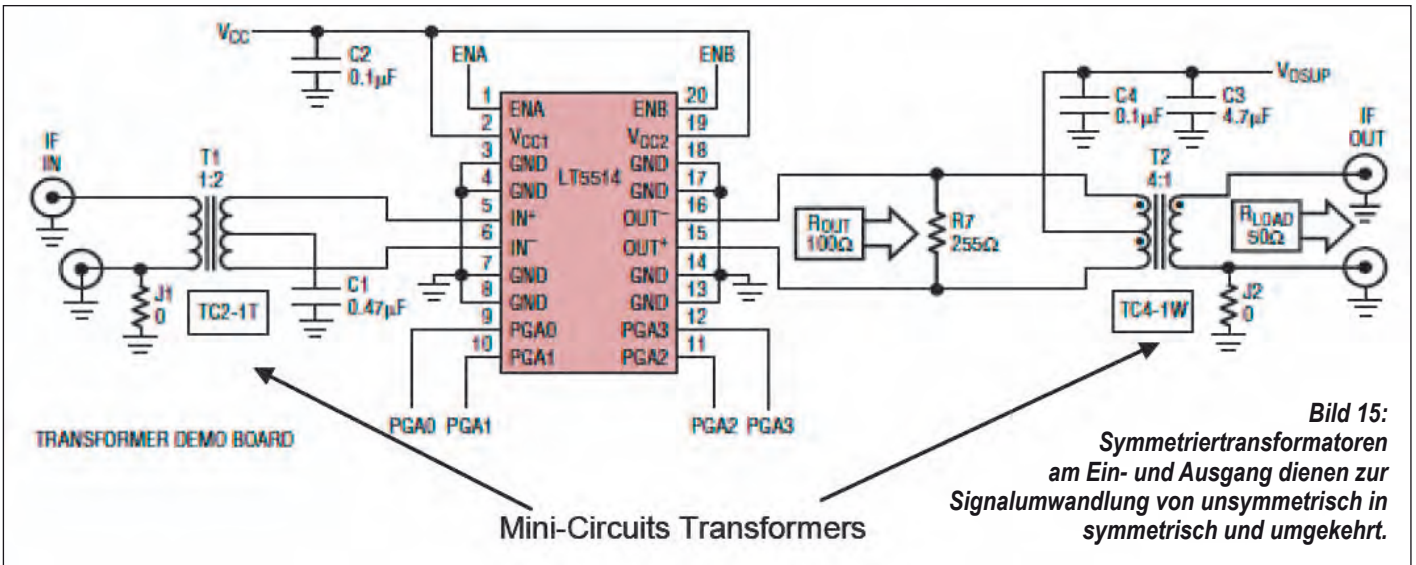


Bild 14: Doppel-Balancemischer



interferierende Signal, das von Natur aus ein Gleichtakt-Stör-signal ist, unterdrückt. In einem idealen Balun haben die Signale, die am Ausgang von symmetrischen Anschlüssen erscheinen, die gleiche Amplitude, unterscheiden sich in der Phase aber um 180°. In Wirklichkeit gibt es sogar in gut aufgebauten Symmetriertransformatoren eine kleine Amplituden- und Phasensymmetrie. Amplitudensymmetrie ist der Unterschied zwischen den Amplituden (in dB), und die Phasensymmetrie ist die Abweichung von 180° in Graden. Ein gut aufgebauter Transformator kann Werte von 0,1 dB Amplitudenabweichung und 1°-Phasensymmetrie in Bandmitte aufweisen. Unsymmetrie führt dazu, dass die Gleichtaktunterdrückung nur endliche Werte erreicht, statt fast unendlich groß ist.

Gegentaktverstärker

Vorteile:

- Unterdrückung geradzahlgiger Harmonischer
- ~ 3 dB höhere Ausgangsleistung, IP3 ebenfalls 3 dB größer als bei einem Einzelgerät

Breitband-Kommunikationssysteme verwenden Signale, die einen Bereich von mehreren Oktaven belegen können. CATV-Signale beispielsweise belegen den Bereich von 50 bis 1000 MHz, das sind mehr als vier Oktaven. Werden solche Signale in konventionellen Verstärkern

verarbeitet, können sie aufgrund der im Verstärker erzeugten Produkte zweiter Ordnung verzerrt werden. Zum Beispiel ist zweite Harmonische eines 50-MHz-Signals 100 MHz, so auch die zweite Harmonische von 400 MHz, die 800 MHz beträgt, wobei beide innerhalb des Bands liegen.

Ein idealer Gegentaktverstärker kann die intern generierten Produkte auslöschen und die Signalqualität erhalten. Bild 10 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild eines derartigen Verstärkers. Er besteht aus zwei Symmetriertransformatoren und zwei identischen Verstärkern. Wenn ein Signal auf den Eingang des ersten Baluns (Balun #1) gelegt wird, besteht das Ausgangssignal des Symmetriertransformators aus zwei Signalen gleicher Amplitude aber außer Phase. Diese Signale werden verstärkt und im Ausgangs-Balun (2) kombiniert.

Der Gewinn eines Gegentaktverstärkers ist der gleiche wie der eines einzelnen Verstärkers, während die Ausgangsleistung jedoch doppelt so groß ist. Gegentaktverbindungen werden häufig zur Kombination der Leistung mehrerer Verstärker verwendet. Ein zusätzlicher Nutzen besteht darin, dass Gegentaktverstärker Produkte geradzahlgiger Ordnung auslöschen, da geradzahlgige Harmonische in Phase sind. Bild 11 zeigt ein Beispiel für die zweite Harmonische. Das gleiche gilt auch für

andere geradzahlgige Produkte, die in die Betriebsbandbreite des Transformators fallen. Der HELA 10+ von Mini Circuits besteht aus einem Verstärkerpaar. Da sie sich auf demselben Chip befinden, sind ihr Gewinn und ihre Phase sehr gut gepasst. Wenn daher ein ausbalanciertes Signal an den Eingabe des HELA 10 +s gelegt wird, dann ist das Ausgangssignal ebenfalls ausbalanciert. Durch Verwendung von zwei Symmetriertransformatoren am Eingang und am Ausgang wird ein unsymmetrisches Eingangssignal zuerst in T1 in ein symmetrisches Signal umgewandelt, dann in HELA 10 verstärkt und im Transformator T2 kombiniert, um ein unsymmetrisches Signal nach Masse zu erhalten. Der IP2 eines derartigen Verstärkers liegt über 87 dBm.

Bild 12 zeigt einen Gegentaktverstärker mit Transistoren. Die Basis erhält ihre Vorspannung über die Mittenanzapfung von T1, die Speisung der Kollektoren erfolgt über T2. Die Trafo-Konfigurationen A, B und F können für diese Aufgabe verwendet werden. Sieht man Trennkondensatoren am Eingang vor, kann auch die Konfiguration H genutzt werden..

Selektionskriterien für die Symmetriertransformatoren:

Betriebsfrequenz: F1 bis F2

Balun-Betriebsfrequenz: 0,5 F1 bis 1,2 F2

Konfigurationen: A, B, F und H

Leistungsteiler 180°

Die Ausgangssignale eines idealen Transformators sind von gleicher Größe und von entgegengesetzter Phase, wie Bild 13. Er kann daher als 180°-Teiler verwendet werden.

Doppel-Balancemischer

In seiner einfachsten Form besteht er aus einem Paar 1:4-Baluns und einem Diodenquartett. Die Mittelanzapfung des LO-Transformators ist geerdet, und die Mittelanzapfung des RF-Baluns (rechts) wird zur Entnahme der ZF verwendet (siehe Bild 14).

Konvertieren von unsymmetrisch in balanciert

Viele am Markt verfügbare ICs haben symmetrische Ein-/Ausgangsanschlüsse. Wenn derartige ICs an unsymmetrische Schaltungen gekoppelt werden müssen, sind Baluns erforderlich. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 15.

Der zweite Teil dieses Artikels befasst sich mit den Konfigurationen und den Eigenschaften von Transformatoren und der Testcharakterisierung ◀