RF- und Mikrowellen-Transformatoren, Teil 2

Der zweite Teil dieses Artikels befasst sich mit den Konfigurationen und den Eigenschften von Transfomatoren und der Testcharakterisierung

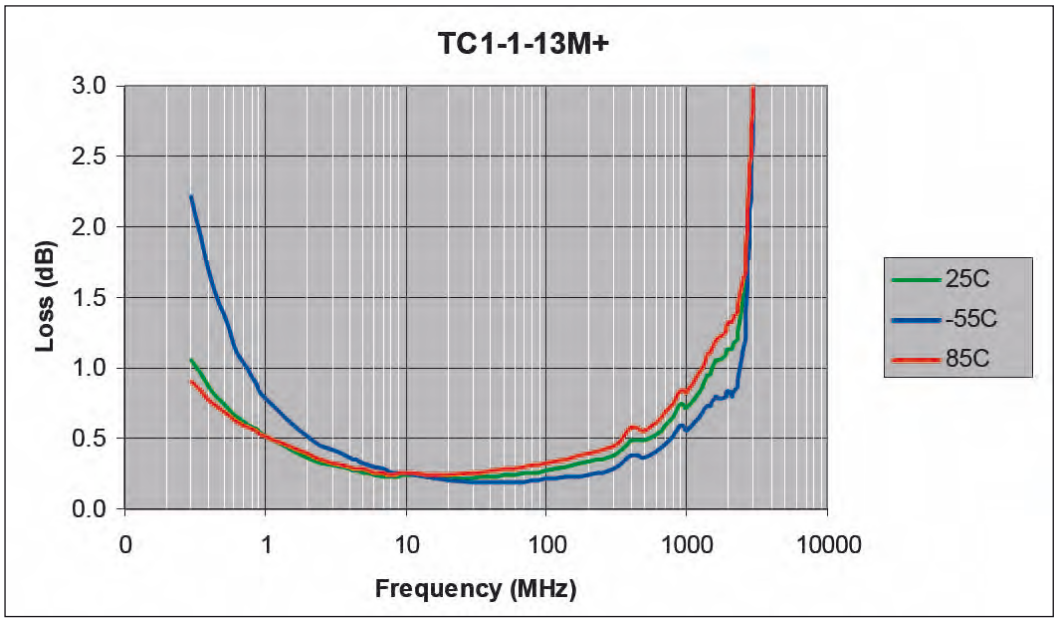


Bild 16: Einfügungsdämpfung eines Kern-und-Draht-Transformators in Abhängigkeit von der Frequenz

Transformator-konfigurationen

Transformatorkonfigurationen können grob wie folgt unterteilt werden:

- Konventionell; Kern-und-Draht-basierend (Konfigurationen A, B, C, D, F)
- Übertragungsleitung; Kern und Draht und LTCC (Konfiguration G, H, K)
- Marchand; LTCC (Konfiguration J)

In Tabelle 1 sehen Sie die Schaltbilder und erhalten alle Informationen über Betriebsfrequenz, Impedanzverhältnis, wichtige elektrische Parameter und Applikationen.

Konventionelle Transformatoren aus Kern und Draht haben optional eine Mittelanzapfung an der Primär- oder der Sekundärseite bzw. auch an beiden Seiten und sind einsetzbar bis 2 GHz. Die meisten Konfigurationen haben eine Gleichspannungs-Isolation zwischen Primär- und Sekundärseite.

Transformatoren vom Transmission-Line-Typ, die Kern und Draht verwenden, arbeiten bis zu 3 GHz, in LTCC-Ausführung sogar bis 5 GHz oder höher und haben keine Gleichstromisolierung zwischen Primär- und Sekundärseite. Dazu sind externe Kondensatoren erforderlich.

Marchand-Transformatoren (nach dem Erfinder benannt) arbeiten bis zu 6 GHz und höher. Sie werden in LTCC-Technologie realisiert und haben Gleichstromisolierung zwischen Primär und Sekundär.

Die Auswahl eines Transformators für eine Anwendung kann oft verwirrend sein und führt manchmal zur falschen Wahl. Die folgenden Richtlinien versuchen, die Auswahl zu erleichtern und die Vorteile der verschiedenen Konfigurationen herauszustellen:

- Für Applikationen zur Impedanzanpassung (unsymmetrisch zu unsymmetrisch) wählen Sie einen Auto-Transformator (Konfiguration –D), da er im allgemeinen den geringsten Einfügungsverlust aufweist.
- Für Balun-Applikationen wählen Sie eine Ausführung mit Mittelanzapfung auf der symmetrischen Seite, da sie für ausgezeichnete Amplituden- und Phasensymmetrie sorgt (Konfigurationen A, B, H, J):
- Für symmetrische Übertragung wählen Sie einen Transformator mit Mittelanzapfung an der Primär- und der Sekundärseite.
- Für Gleichstromisolierung zwischen Primär- und Sekundärseite wählen Sie keine Übertragungsleitungs-Konfigurationen (G, H, K). Sofern erforderlich fügen Sie Blockierkondensatoren hinzu, um Primär- und Sekundärseite zu isolieren.

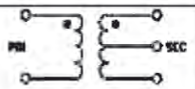
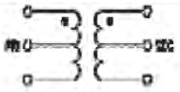
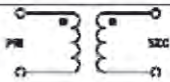
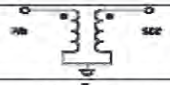
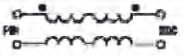
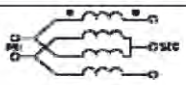
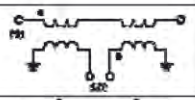
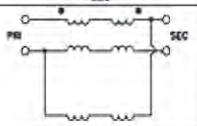
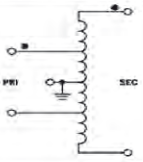
Eigenschaften von Transformatoren

Einfügungsverlust

Bild 16 zeigt den Einfügungsverlust eines Kern-und-Drahttransformators. Der Verlust am unteren Ende des Frequenzbereichs wird stark von der Primärinduktivität beeinflusst, während der Verlust am oberen Bereichsende von den Verlusten durch die Kapazität zwischen den Windungen und der Serien-Induktivität abhängt.

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

Tabelle 1: Zusammenfassung der Transformator-Konfigurationen

Configuration	Schematic	Description	Frequency (MHz) Typical maximum range	Impedance ratio Typical maximum ratio	Unbalance	DC Isolation	Power handling Typical use	Applications: Impedance Conversion	Applications: Balun	Applications: Balanced to Balanced
A		DC isolated primary and secondary, center-tap secondary	0.01 to 1400	1 to 16	Excellent	Yes	Up to 1W	YES	YES	YES
B		DC isolated primary and secondary, center-tap primary and secondary	0.004 to 500	1 to 25	Excellent	Yes	Up to 0.25 W	YES	YES	YES
C		DC isolated primary and secondary	0.01 to 1200	1 to 36	Average	Yes	Up to 0.25 W	YES	YES	YES
D		Auto transformer	0.05 to 2200	0.1 to 14	N/A	No	Up to 0.25 W	YES	--	--
F		DC isolated, three open windings, Tri-filar transformer	0.01 to 200	1 to 2	Good	No	Up to 0.25 W	YES	YES	YES
G		Transmission line transformer	0.5 to 3000	1 to 4	Good	No	Up to 2 W	YES	YES	YES
H		Transmission line transformer-four windings	10 to 4500	2 & 4	Good	No	Up to 5 W	YES	YES	YES
J		Marchand Balun	600 to 6200	1 to 4	Excellent	Yes	3 W	YES	YES	--
K		Transmission line transformer: Tri-Filar	5 to 3000	1	Excellent	No	Up to 0.5W	--	YES	YES
L		Balnced to balanced transformer	10 to 2200	1.5 to 2	Good	No	Up to 0.25W	YES	--	YES

Die Permeabilität eines magnetischen Kerns wird durch die Temperatur beeinflusst. Wenn die Temperatur abnimmt, nimmt auch die Permeabilität ab und verursacht eine Zunahme des Einfügungsverlusts bei niedrigen Frequenzen. Bild 17 zeigt den Einfügungsverlust eines LTCC-Transformators. Beachten Sie, dass der Einfügungsverlust über das ganze Band hinweg niedrig ist, da die Verluste in der Keramik minimal sind und ebenfalls die Schwankung mit der Temperatur.

Unbalance: Amplitude und Phase

Eine beliebige anliegende Spannung (V1) wird in zwei Spannungen V2 und V3 (siehe Bild 18) trnasformiert. In einem idealen Transformator ist die Amplitude von V2 der von V3 gleich, und der Phasenunterschied beträgt 180º. In praktischen Transformatoren gibt es jedoch einen kleinen

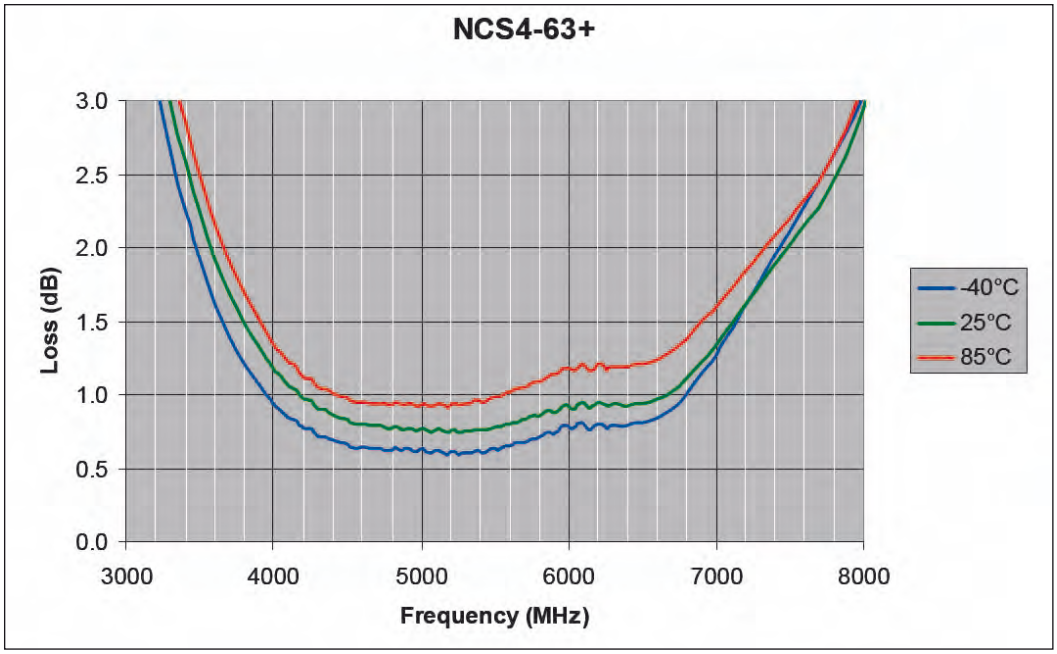


Bild 17: Einfügungsverlust eines LTCC-Transformators in Abhängigkeit von der Frequenz

Amplitudenunterschied, und der Phasenunterschied weicht von 180º (siehe Bild 19) ab.

Amplituden-Unsymmetrie in (dB) = 20 log10 (V2/V3)

Phasen-Unsymmetrie in Graden = Θ in Graden

Testcharakterisierung von Transformatoren

Einfügungsverlust

Vor der Verfügbarkeit von modernen Netzwerkanalysern wurden Baluns und Transformatoren mit einem von 1:1 abweichenden Impedanzverhältnis Rücken an Rücken miteinander verbunden und der gesamte Einfügungsverlust der beiden Einheiten gemessen. Die Einfügungsdämpfung eines einzelnen Transformators wird durch Division durch zwei ermittelt. Dadurch entfiel die Notwendigkeit der Impedanzanpassung von Bauelementen, die eine andere Ausgangs-Impedanz als 50 Ohm hatten.

In den letzten Jahren sind Symmetrietransformatoren als 3-Port-Netzwerke charakterisiert worden, wie ein Zweiwege-180°-Teiler. Da die Impedanz an den sekundären Anschlüssen im Allgemeinen nicht 50 Ohm beträgt, ist Impedanzumwandlung erforderlich, um eine genaue Messung machen zu können. Eine Methode besteht darin, ohmsche Anpass-Pads an der Sekundärseite zu benutzen. In dieser Methode werden Einfügungsverluste vom Hauptpunkt an der Primärseite zum Punkt an der Sekundärseite und vom Primärpunkt zur Sekundärseite gemessen. Der Durchschnitt dieser beiden Verluste, nach dem Subtrahieren des 3-dB-Verlusts des Anpassgliedes sowie 3 dB für die theoretische Leistungsteilung, ist als Einfügungsverlust spezifiziert. Neue Netzwerkanalyser, wie Agilents PNA-Serie, ermöglichen Impedanzumwandlung und Porterweiterung, so dass es keinen Grund gibt, ohmsche Anpasspads hinzuzufügen. Ein PNA-Analysegerät ermöglicht 3-Port-Messungen für jede vom Anwender vorgesehene Ein- und Ausgangsimpedanz.

Unbalance: Amplitude und Phase

Der Messaufbau zur Charakterisierung eines Transformators als 3-Port-Netzwerk enthält zwei Einfügungsverluste in Vektorform:

- primärer Punkt zu sekundärem Punkt
- primärer Punkt zu Sekundärwicklung

Die Differenz zwischen diesen beiden Werten in dB wird Amplitudenunsymmetrie genannt. Die Phasenwinkelabweichung von 180° ist die Phasenunbalance.

Eingangsrückfluss-Verluste

Wenn die Sekundärseite mit ihrer idealen Impedanz abgeschlossen ist, dann ist der an der Primärwicklung gemessene Rücklaufverlust der Eingangs-Rücklaufverlust. Er ist ein Maß für die Wirksamkeit des Symmetrietransformators bei der Transformation der Impedanz.

S-Parameter

Durch das Verwenden eines Multiport-Netzwerkanalyzers können S-Parameter gemessen werden. Das resultierende „.snp“-File ist im Touchstone-Format und kann in Simulatoren wie Agilents ADS (oder äquivalent) benutzt werden. Wenn eine Anwendung eine andere Impedanz außer der im Datenblatt angegeben benötigt, kann das „.snp“-File bei Simulationssoftware wie ADS genutzt werden, um ihre Performance zu analysieren.

Referenzen

1) Mini-Circuits Application Note: „How RF Trasnformers Work“
http://www.minicircuits.com/pages/pdfs/howxfmerwork.pdf
2) Nathan R. Grossner „Transformer for Electronic Circuits“ McGraw-Hill, Zweite Auflage, 1983
3) R. Setty, „Push-pull amplifiers improve second-order intercept-point“.
RF Design P76, Nov.
4) Mini-Circuits website:
http://www.minicircuits.com/cgi-bin/modelsearch?Model = hela 10
5) Dorin Seremeta, „Accurate Measurement of LT5514 Thierd order Modulation Products“ Linear AP note 97-3
6) „ Transformers RF/IF“, Mini-Circuits web page
http://minicircuits.com/products/transformers.html

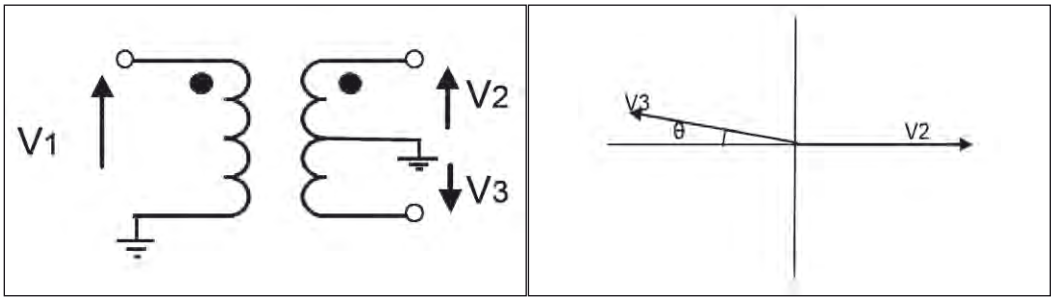


Bild 18+19: Unsymmetrie im Transformator (links) und in Polardarstellung (rechts)