Reflektionsfreie Filter verbessern Linearität und Dynamikbereich in Mikrowellensystemen

Dieser Artikel stellt eine neue Klasse reflektionsfreier Filter vor, die intern Signale im Sperrbereich absorbieren, statt sie zurück zur Quelle zu reflektieren. Die Ableitung der Filter und die Design-Methodologie werden erläutert und ihre Leistungsmerkmale geprüft. Vorteile bei verschiedenen praktischen Anwendungen werden erörtert und handelsübliche Filtermodelle vorgestellt.

Reflektionsfreie Filter vermeiden eine Reihe von System-Problemen, die für konventionelle Filterdesigns typisch sind, und bieten - speziell in Verbindung mit empfindlichen Komponenten wie Mischern, Multiplizierern und Verstärkern mit hohem Gewinn – deutliche Vorteile. Das Fehlen von Reflektionen im Sperrbereich, das für diese Filter spezifisch ist, führt zur Unterdrückung von Inband-Intermodulation und unerwünschten Nebenwellen, wodurch sich Linearität und Dynamikbereich in einer Vielfalt von Mikrowellensystemen verbessern.

Filter sind Grundbausteine beinahe jedes modernen RF-/Mikrowellensystems, die unerwünschte Signale in Empfänger- und Senderarchitekturen eliminieren. Bis vor kurzem widmete sich die Forschung im Filterdesign im Wesentlichen den Topologien, in denen die Unterdrückung von Frequenzen im Sperrbereich durch Reflektion der unerwünschten Signale zurück zur Quelle erreicht wird. Es gibt jedoch viele Anwendungen, in denen diese Reflektionen Intermodulationsprodukte, Welligkeit im Verstärkungsgang und andere Probleme im Bereich der Systemleistung verursachen. Beispielsweise sind nichtlineare Baugruppen wie Mischer, Multiplizierer und Verstärker mit hohem Gewinn, die auf Außerbandfrequenzen reagieren, sehr empfindlich in Bezug auf die von konventionellen Filtern verursachten Reflektionen. Dies ist eine besondere Herausforderung, da Filter oft in der Nähe oder direkt bei aktiven Stufen im Signalpfad benötigt werden, um die Bandbreite besser zu definieren oder unerwünschte Harmonische zu unterdrücken.

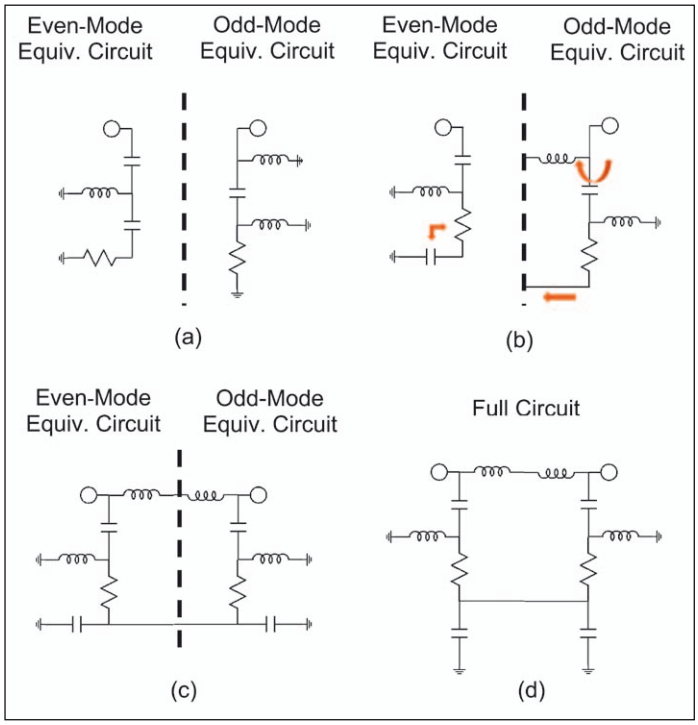


Bild 1: Ableitung eines reflektionsfreien Tiefpassfilters. a) äquivalente Gleich- und Gegentakt-Schaltungen, die Gleichung (3) erfüllen; b) Neuanordnung der vorhandenen Elemente; c) Hinzufügen inaktiver Elemente um Symmetrie zu erreichen; d) endgültige Schaltungstopologie

Zwar gibt es eine Reihe von „Brechstangenlösungen" gegen diese störenden Nebenwirkungen, wie z.B. zusätzliche Dämpfungsglieder oder Isolationsverstärker um empfindliche Bestandteile, jedoch sind diese Techniken dafür bekannt, dass sie den Rauschabstand des Gesamtsystems (SNR) und den Dynamikbereich verschlechtern können. Die Absorption von Sperrbereichssignalen wurde durch impedanzgerechten Abschluss eines Diplexer-Ports, oder aller Ports (außer einem) bei Multiplexern erreicht. Diese Lösung hat aber einen großen Platzbedarf und führt - aufgrund von Fehlanpassungen im Übergangsbereich vom Durchlass- zum Sperrebereich - immer noch zu Reflektionen. Symmetrierte Filter mit Quadraturhybriden an Ein- und Ausgang können ebenfalls verwendet werden, um die Schaltung gegen Reflektionen zu puffern, aber die Bandbreite des Filters ist dann durch die des Hybrids begrenzt, was diese Technik für Breitbandanwendungen ungeeignet macht.

Daher besteht ein eindeutiger Bedarf an neuen Filtertopologien in RF- und Mikrowellensystemen, bei denen die Sperrbereichsenergie in der Schaltung absorbiert wird, statt zur Quelle reflektiert zu werden. Dieser Bedarf hat zu intensiver Forschung und Entwicklung einer neuen, patentierten Topologie reflektionsfreier Filter geführt, die Mini-Circuits in letzter Zeit für den Markt zum kommerziellen Einsatz freigegeben hat.

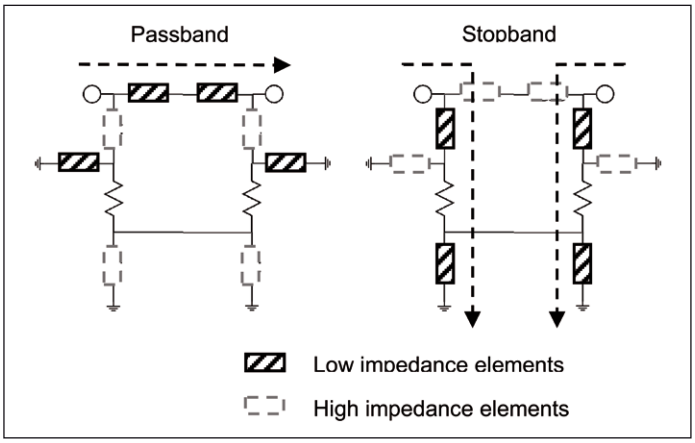


Bild 2: Durchlass- und Sperrbereich-Signalpfade durch ein reflektionsfreies Tiefpassfilter

Mini-Circuits
www.mincircuits com

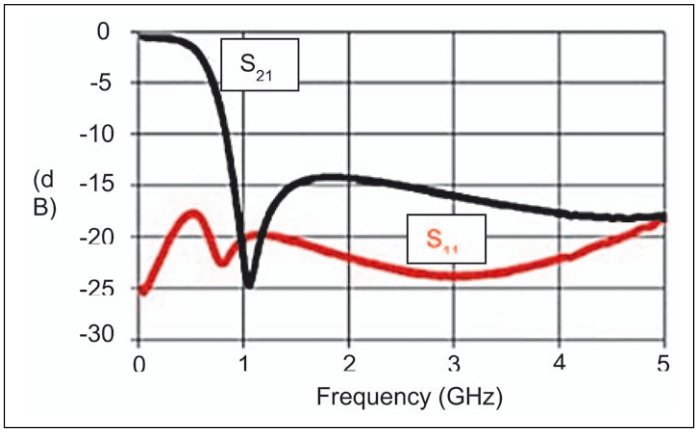


Bild 3: Typisches Verhalten eines reflektionsfreien, einpoligen Tiefpassfilters

Filterableitung und Erweiterungen

Die Topologie reflektionsfreier Filter geht zunächst von einem symmetrischen Zweitor-Netzwerk aus und wird abgeleitet auf Basis der Gleich- und Gegentakt-Analyse (even-odd-mode analysis). Dieser Lösungsansatz ermöglicht es, dass der Vierpol (theoretisch) in zwei Eintor-Netzwerke geteilt wird, von denen jedes die Hälfte der Elemente des Vierpols enthält. Im äquivalenten Gleichtakt-Modus-Ersatzschaltbild herrscht an allen Knoten, die auf der Symmetrieebene liegen, Leerlauf, während im äquivalenten Gegentakt-Modus-Ersatzschaltbild alle Knoten, die auf der Symmetrieebene liegen, eine Ground-Verbindung (oder einen virtuellen Kurzschluss) haben. Die S-Parameter des symmetrischen Vierpols werden deshalb als Überlagerung der Gleich- und Gegentakt-Modus-Reflektionskoeffizienten definiert, woraus folgt (1):

$$s_{11} = s_{22} = \frac{1}{2}(\Gamma_{even} + \Gamma_{odd})$$

und (2)

$$s_{21} = s_{12} = \frac{1}{2}(\Gamma_{even} - \Gamma_{odd})$$

Wenn die Schaltung reflektionsfrei sein soll, muss s11 Null sein (normalisiert zur charakteristischen Impedanz des Netzwerks). Es folgt daraus, dass (3)

$$\Gamma_{even} = -\Gamma_{odd}$$

Diese Bedingung wird erfüllt, wenn die korrespondierenden Elemente der äquivalenten Even- und Odd-Mode-Ersatzschaltbilder dual zueinander sind. Die Ableitung eines reflektionsarmen Tiefpassfilters, das dieser Methode entspricht, wird in Bild 1 [1] [2] kurz erläutert.

In der resultierenden Schaltung durchlaufen Signale im Durchlassbereich das Filter direkt vom Eingang zum Ausgang. Signale im Sperrbereich werden direkt den Widerständen zugeführt, die das Signal intern abschließen und absorbieren [1].

Den typischen Verlauf von S11 und S21 bei einem einpoligen, reflektionsfreien Tiefpassfilter zeigt Bild 3. Das Filter hat eine inverse Tschebychev-Charakteristik 3. Ordnung, unterscheidet sich von konventionellen Filtern aber dadurch, dass der Reflektionskoeffizient bei allen Frequenzen Null ist [2]. Bei diesem Beispiel wurde ein reflektionsfreies Tiefpassfilter gezeigt, jedoch wurde dieselbe Technik auch zur Ableitung einer Vielzahl von Hoch- und Bandpässen sowie Bandsperren verwendet.

Erweiterungen dieses Designansatzes schließen Filter höherer Ordnung mit ein, in denen die

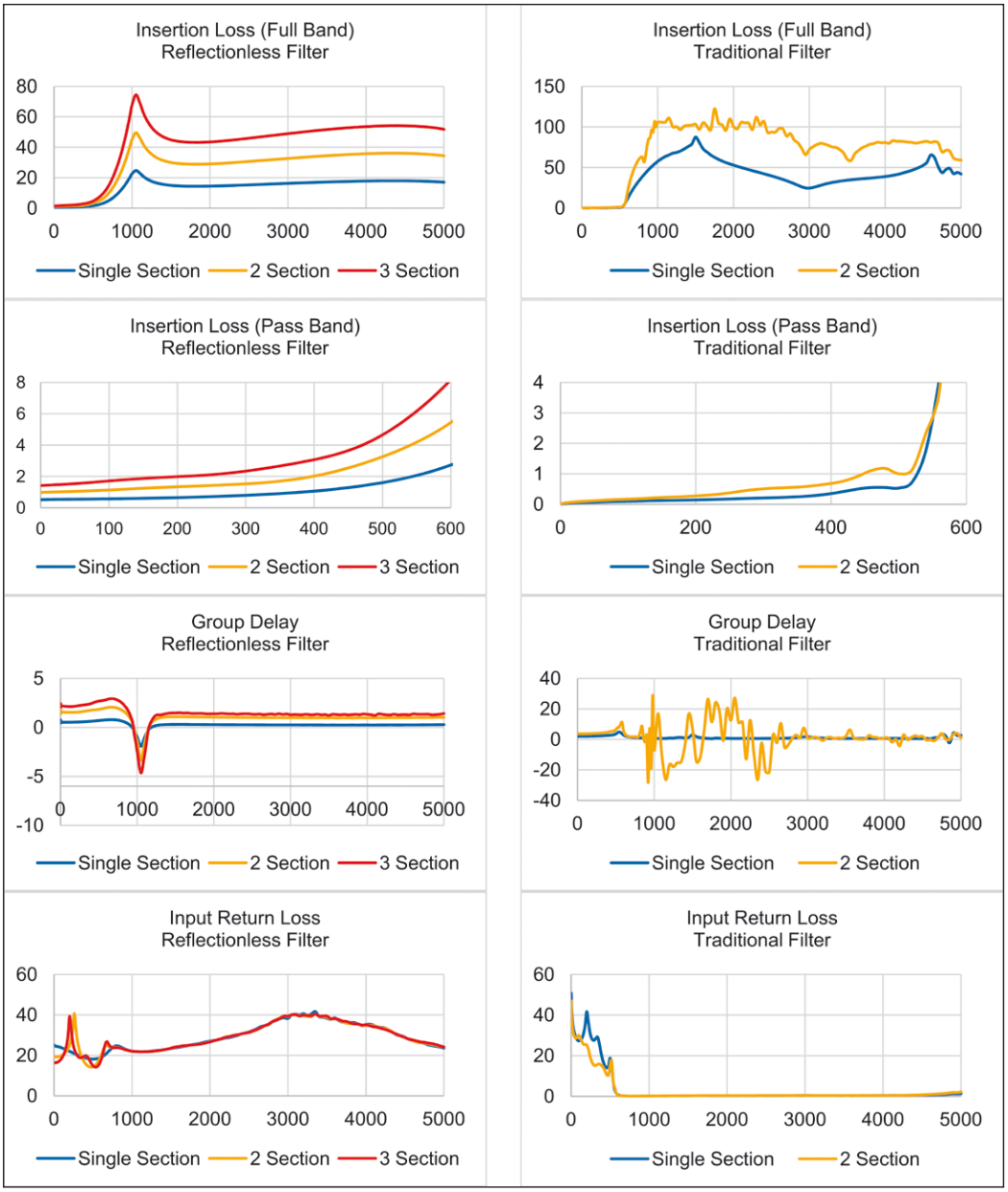


Bild 4: Leistungsvergleich traditioneller und reflektionsfreier Filter beim Einsatz in mehreren Abschnitten

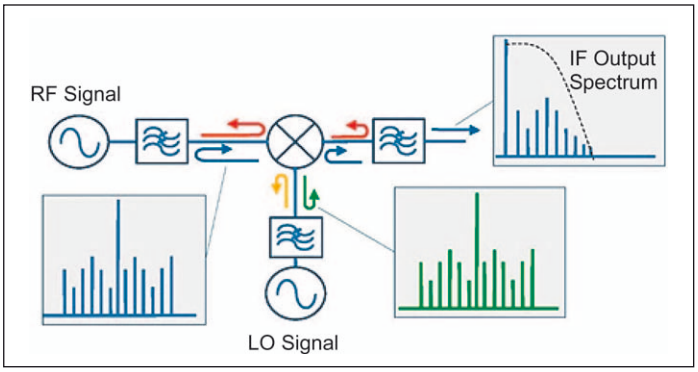


Bild 5: Typische Erweiterung des Spektrums durch Intermodulation, die durch Reflektionen von mehrstufigen Filtern verursacht wird

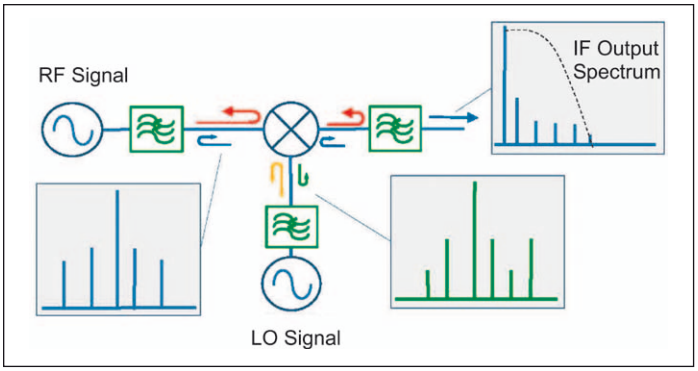


Bild 6: Minimisierung der Intermodulationserweiterung durch Verwendung reflektionsfreier Filter an den Mischer-Ports

Abschlusswiderstände durch angepasste Subnetze ersetzt werden, um Verbesserungen bezüglich der Dämpfung im Sperrbereich und der Steilheit im Übergangsbereich zu bewirken. Beispielsweise wurde eine Serie von Tiefpassfiltern dritter Ordnung entwickelt, in denen drei reflektionsfreie Filter ineinander verschachtelt werden. Diese Designs erreichen steilere Übergänge und höhere Unterdrückung in der ersten Oktave des Sperrbereichs, verglichen mit den Daten reflektionsfreier Tiefpässe erster Ordnung.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Sperrdämpfung oder zur Zusammenschaltung von Hoch- und Tiefpassfiltern zur Erzeugung eines Bandpassverhaltens bieten in vielen Anwendungen kaskadierte Filter. Während die Kaskadenschaltung herkömmlicher Filter Inband-Welligkeit sowie Phaseninstabilität hervorrufen kann, lassen sich reflektionsfreie Filter sogar in drei Sektionen einsetzen, ohne dass diese Effekte sich auf die Leistung des Filters auswirken. Graphiken zur Veranschaulichung der typischen Einfügungs- und Rücklaufdämpfung sowie der Gruppenlaufzeitverzögerung eines traditionellen Filters im Vergleich zu einem reflektionsfreien Filter zeigt Bild 4.

Praktische Anwendungen

Reflektionsfreie Filter eignen sich besonders gut für die Zusammenschaltung mit empfindlichen, nichtlinearen Komponenten, was bei traditionellen Filtern praktisch immer problematisch ist. In einem Beispiel wird ein Filter hinter einem Mischer in der Signalkette angeordnet. Mischer erzeugen u.a. unerwünschte Mischprodukte, LO-Harmonische höherer Ordnung und andere störende Signalkomponenten, die ausgefiltert werden müssen. Bei einem gewöhnlichen Filter werden diese unerwünschten Nebenwellen üblicherweise zurück in den Mischer reflektiert wo sie erneut umgesetzt, oder mit den erwünschten Signalen neu gemischt werden und dadurch ein ganzes Störspektrum erzeugen, das in den Filter-Durchlassbereich fallen kann.

Die Reduzierung der von nichtlinearen Mischern produzierten Intermodulationsprodukte ist immer ein Designziel gewesen, und die Industrie hat auch Fortschritte mit FET-basierten Mischern mit hohem Dynamikbereich erzielt. Jedoch produzieren alle Mischer - prinzipbedingt - Intermodulationsprodukte mit irgendeinem Pegel an jedem Port, die dann mit den benachbarten Elementen in der HF-Signalkette reagieren. Wenn diese benachbarten Elemente Filter sind, werden die Außerband-Intermodulationsprodukte vollständig zurück in den Mischer reflektiert, wo sie mit dem Grundsignal wieder rekombinieren und weitere "Familienmitglieder" unerwünschter Mischprodukte produzieren. Manche von ihnen erreichen den ZF-Ausgang, andere finden sich im Durchlassbereich wieder und begrenzen dadurch die gesamte Dynamik des Systems.

Wenn diese Reflektionen aus dem Filter-Sperrbereich reduziert werden, werden auch die unerwünschten Inband-Intermodulationsprodukte weniger, was zu einer Verbesserung des gesamten Systemdynamikbereichs führt.

Diese unerwünschte Nebenwellen können eine beachtliche Größe bei undefinierter Phase erreichen. Daher können sich diese Signale bei bestimmten

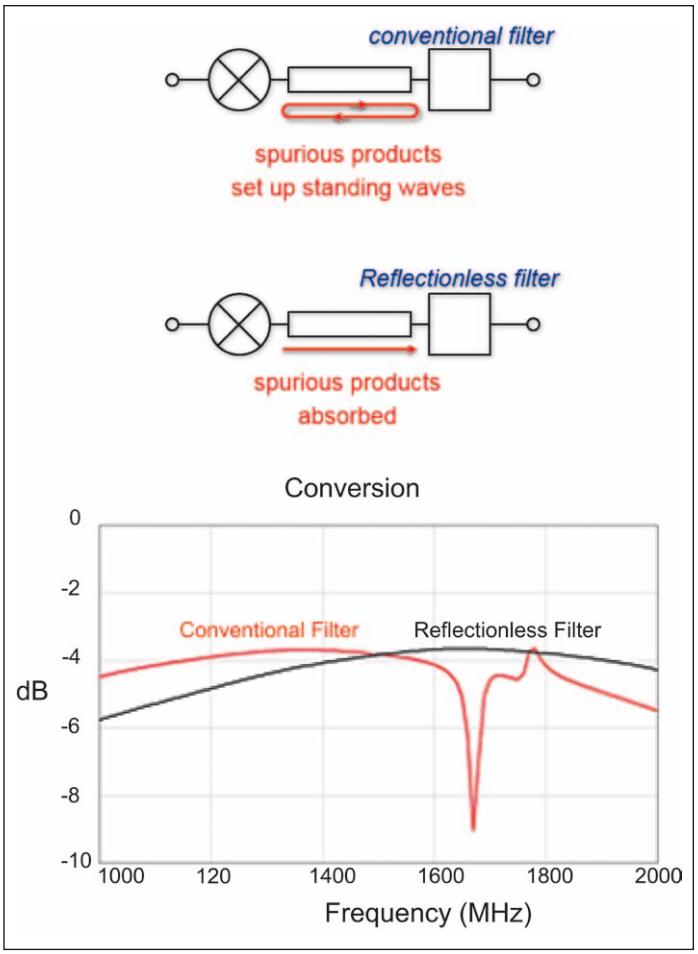
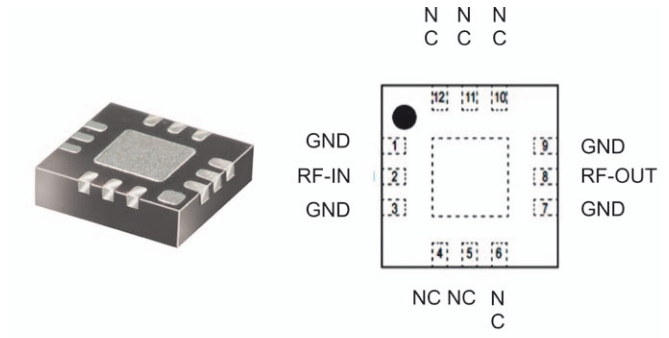


Bild 7: Einfache Simulation eines Mischers, gefolgt von einem über eine Übertragungsleitung angeschlossenen, traditionellen sowie einem reflektionsfreien Filter



Funktion	Blocknummer	Beschreibung
RF-IN	2	RF-Eingang
RF-AUS	8	RF-Ausgang
GND	1,3,7,9	Mit Boden verbunden
NC (GND äußerlich.)	4,5,6,10,11,12	Keine interne Verbindung

Bild 8: Gehäuseform und Pinbeschaltung für reflektionsfreie X-Serien-Filter

Phasenlagen destruktiv in das Signal für die Abwärts-Umsetzung mischen und an irgendeinem Punkt im Frequenzspektrum eine starke Dämpfung verursachen, wie es die rote Kurve in Bild 7 verdeutlicht. Dieser Effekt tritt gewöhnlich in Breitbandsystemen auf, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass über eine größere Bandbreite eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine zerstörerische Phasenlage zwischen der Reflektion und dem gewünschten Signal besteht. Sogar in Fällen, wo dieser Effekt nicht auftritt, ändert sich die allgemeine Form der Mischdämpfungskurve und wird etwas wellig, sowie sich die elektrische Länge der Leitung zwischen dem Mischer und dem Filter ändert. Dadurch ist diese Mischer-Filterkombination auch gegen Umweltbedingungen empfindlich.

Das reflexionsfreie Filter jedoch hat keine derartigen Auswirkungen auf die Leistung der Mischer, weil die unerwünschten Mischprodukte im Filter absorbiert statt zurück in den Mischer reflektiert werden. Der Dämpfungsverlauf der Mischer in dieser Anordnung zeigt nicht nur keinen Signaleinbruch (suck out) mehr bei bestimmten Frequenzen, sondern ist auch völlig unempfindlich gegenüber der Leitungslänge zwischen Filter und Mischer.

Dieselben Eigenschaften machen reflektionsfreie Filter geeignet für die Verwendung in Verbindung mit anderen empfindlichen Schaltungsbestandteilen, wie zum Beispiel Multiplikatorenketten, wo Reflektionen für unerwünschte harmonische Multiplikation und Welligkeit im Mischverstärkungs-Verlauf verantwortlich sind. Sie wurden auch dafür eingesetzt, den nebenwellenfreien Dynamikbereich (SFDR) von A/D-Wandlern (ADCs) durch Absorption unerwünschter Nebenwellen zu erweitern, bevor sie zurück in den A/D-Wandler gelangen können. In ähnlicher Weise können sie dazu verwendet werden, unerwünschte Rückkopplung in High-gain-Verstärkern zu eliminieren, um dadurch Stabilitätsprobleme zu vermeiden. Zusätzliche Dämpfungsglieder zur Pufferung der Sperrbereichsreflektionen werden dadurch überflüssig.

Die Entwicklung der Topologie reflektionsfreier Filter ist ein bedeutender Fortschritt, der einschneidende Verbesserungen der RF-Systemleistung in vielen Anwendungen ermöglicht. Diese Technik löst eine Anzahl von schon seit langer Zeit bestehenden Problemen, die mit eingebetteten Filtern in Sende- und Empfangsketten verbunden sind.

Manche Anwendungen, die davon profitieren (oder schon profitiert haben), traditionelle Filter durch reflektionsfreie Filter zu ersetzen, sind in diesem Artikel erörtert worden, aber der volle Umfang ihrer Nützlichkeit in praktischen Anwendungen muss noch realisiert werden.

Mini-Circuits gibt zum Start 23 Modelle zur Vermarktung frei. Darunter sind Tiefpässe 1. und 3. Ordnung sowie Hoch- und Bandpass-Designs mit Durchlassbereichen von DC bis 17 GHz.

Die Filter werden auf GaAs unter Verwendung der IPD-Verfahrenstechnik hergestellt und in winzigen 3x3 mm-QFN-Gehäusen mit ausgezeichnetem ESD-Schutz verpackt.

Referenzen

[1] M. Morgan und T. Boyd, „Theoretische und experimentelle Studie über eine neue Klasse reflektionsfreier Filter“ IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol. 59, no.5, pp 1214-1221, May 2011

[2] M. Morgan und T. Boyd, „Reflektionsfreie Filterstrukturen“ IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol. 63, Nr. 4, pp. 1263-1271, April 2015.

Filter Type	Model Number	Passband (MHz)	Stopband (MHz)
Low Pass	XLF-151+	0 – 150	460-16000
	XLF-221+	0 – 220	570-12000
	XLF-421+	0 – 420	900-18000
	XLF-551+	0 – 550	1140-18500
	XLF-861+	0 – 860	1700-25000
	XLF-122+	0 – 1150	2190-21000
	XLF-192+	0 – 1900	3480-30000
	XLF-252+	0 – 2500	4550-30000
	XLF-332+	0 – 3250	5900-30000
	XLF-732+	0 – 7300	14300-34000
	XLF-982+	0 – 9800	19000-32500
Low Pass (3rd Order)	XLF-63+	0 – 6000	14300-34000
	XLF-73+	0 – 7000	11700-21300
	XLF-762+	0 – 7600	13100-20000
	XLF-962+	0 – 9600	14800-25200
	XLF-14+	0 – 10000	15800-24200
	XLF-123+	0 – 12200	18100-29000
	XLF-133+	0 – 13100	19500-30000
	XLF-173+	0 – 17000	23900-33000
High Pass	XHF-23+	2010 – 10100	DC-1210
	XHF-252+	2460 – 10400	DC-1520
	XHF-392+	3940 – 11500	DC-2450
Band Pass	XBF-282+	2350 – 3150	DC – 1810, 3800 - 20000

Tabelle 1: Reflektionsfreie Filtermodelle von Mini-Circuits