

Agilent Netzwerkanalyse-Lösungen

Einfaches Abstimmen von Frequenzfiltern mit der Zeitbereichsmethode

Die Zunahme von drahtlosen Kommunikationsdiensten zwingt immer mehr Kanäle zu einem geringeren Frequenzspektrum. Um Interferenzen zu vermeiden werden teils sehr strenge Filteranforderungen an alle Systeme gestellt. Diese Systeme verwenden normalerweise gekoppelte Resonator Filter zur Handhabung der Leistungspegel und sorgen für die nötige Isolierung. Die Schwierigkeit des schnellen und akkuraten Abstimmens dieser Filter begrenzen Hersteller oft in der Produktionsmenge und verhindern Kostensenkungen.

In einem Filter mit gekoppelten Resonatoren muss die Mittenfrequenz jedes Resonators genau abgestimmt sein. Die Kopplungen zwischen den Resonatoren müssen ebenfalls genau eingestellt werden, um das richtige Durchlassverhalten, geringe Rückflussdämpfung (Reflexion) und kleine Durchlasswelligkeit zu erreichen. Das Einstellen der Koppelkoeffizienten und das Abstimmen der Resonatoren ist ebenso Kunst wie Wissenschaft; oft ein Versuch-und-Irrtum-Anpassungsprozess. Doch es gibt eine Alternative.

Dieser Anwendungshinweis beschreibt eine Abstimm-Methode eines Filters, der die Zeitbereichsantwort der Rückflussdämpfung verwendet, was die Filterabstimmung erheblich vereinfacht. Es ist möglich, jeden Resonator einzeln abzustimmen, da Zeitbereichsmessungen unterscheiden können zwischen den individuellen Antworten jedes Resonators und ihrer Koppelung. Eine solche eindeutige Identifizierung von Antworten ist in der Frequenzdarstellung äußerst schwierig. Kopplungskoeffizienten können präzise eingestellt werden um eine gewünschte Filterantwort bereitzustellen, und jede Interaktion, die durch Änderung der Kopplungsstrukturen und Resonatoren verursacht werden, können sofort erkannt und korrigiert werden.

Der vielleicht wichtigste Vorteil der Zeitdomänen-Abstimmungsmethode ist, dass es Unerfahrene ermöglicht, das Abstimmen von Multipolfiltern nach nur kurzer Einweisung zu Erlernen. Eine so schnelle Beherrschung des Abstimmprozesses ist mit vorherigen Abstimmmethoden unmöglich. Diese Technik eignet sich auch gut für die automatisierte Produktionsumgebung, die schon immer eine Herausforderung war.

Schwierigkeiten der Filterabstimmung

Die interaktive Natur von Filtern mit gekoppelten Resonatoren macht es schwierig zu bestimmen, welcher Resonator bzw. Kopplungselement abgestimmt werden muss. Obwohl einige Abstimmmethoden ein annähernd richtiges Filterverhalten erreichen können, erfordert die Endabstimmung oft eine scheinbar zufällige Anpassung jedes Elements, bis die endgültige gewünschte Filterform erreicht ist. Erfahrene Abstimmer können ein Gespür für richtige Einstellmethoden entwickeln, aber oft sind Monate erforderlich bevor ein Anfänger den Abstimmprozess eines komplexen Filters beherrschen kann. Die Zeit und die damit verbundenen Kosten für die Abstimmung und die Schwierigkeit und die Kosten bei der Ausbildung neuen Personals kann das Wachstum und die Reaktionsfähigkeit eines Unternehmens auf veränderte Kundenbedürfnisse einschränken.

Einige Unternehmen haben versucht, den Abstimmprozess zu automatisieren, indem sie Automaten eingesetzt haben um die Abstimmerschrauben mittels eines Algorithmus zu betätigen. Die Abstimmungsalgorithmen sind ein besonderes Problem, vor allem wenn ein Filter fast abgestimmt ist, werden die Abhängigkeiten der benachbarten Resonatoren so groß, dass eine endgültige Abstimmung nicht erreicht werden kann. Neue Filterentwürfe können vollständig neue Algorithmen erfordern, die es noch schwieriger machen, mit den sich ändernden Anforderungen Schritt zu halten. Herstellungsänderungen, welche die Komponenten des Filters betreffen wie Werkzeugverschleiß oder Lieferantenwechsel, können auch Algorithmen und Prozesse weniger wirksam werden lassen.

In einigen Fällen durchlaufen abgestimmte Filter Temperaturzyklen oder andere Umweltbelastungen als Teil des Herstellungsprozesses so dass deren Eigenschaften sich dadurch ändern können. Mit herkömmlichen Abstimmmethoden kann es sehr schwierig sein, diejenigen Resonatoren oder Koppelöffnungen zum Nachabstimmen zu identifizieren.

Ideale Abstimmmethode

Die Lösung für diese Schwierigkeiten wäre eine Abstimmmethode, die einfach, flexibel und deterministisch ist. Das heißt, eine Methode, bei der die individuelle Einstellung jedes Abstimmelement, Resonator und Blende zielführend ist und nicht abhängig ist von den anderen Elementen im Filter. Die Reaktion auf jede Abstimmerschraube wäre leicht zu identifizieren, und alle interaktiven Wirkungen könnten sofort erkannt und berücksichtigt werden. Im Idealfall

müsste jede Schraube nur einmal justiert werden. Letztendlich würde das Abstimmungsverfahren nicht vom Filtertyp oder -form oder Anzahl der Filterpole abhängen.

Dieser Anwendungshinweis stellt eine Technik vor, die eindeutig den Resonator oder die Kopplungsöffnung identifiziert, welche abgestimmt werden muss und es dem Bediener ermöglicht, Interaktionen zu erkennen und zu korrigieren. Filter können innerhalb ihres Abstimmereiches auf jede Filterform abgestimmt werden. Obwohl diese Technik nicht das ideale Ziel erreicht, nur eine einzige Einstellung jeder Schraube erforderlich zu machen, so vereinfacht und beschleunigt sie die Filterabstimmung erheblich.

Grundlegende Eigenschaften von Bandpassfiltern

Lassen Sie uns zunächst einige grundlegende Informationen und Eigenschaften von Bandpassfiltern in Erinnerung rufen.

Bandpassfilter werden üblicherweise durch eine Frequenztransformation aus Tiefpassfiltern entworfen. Gekoppelte Resonatoren, bestehend aus konzentrierten LC-Resonatoren, coaxialen Leitungsresonatoren, Hohlraumresonatoren oder Mikrowellen-Wellenleiter-Resonatoren werden verwendet, um eine Frequenztransformation zu höheren Frequenzen zu ermöglichen. Die Begriffe Resonator und Hohlraumresonator, welche in diesem Anwendungshinweis verwendet werden, sind austauschbar. Mehr Einzelheiten zum Design von Bandpassfiltern finden Sie in Anhang A.

Die Mittenfrequenz des Filters wird durch die Abstimmung der Resonatoren bestimmt. In den meisten Designs werden alle Resonatoren genau auf die Mittenfrequenz des Filters eingestellt, wobei die Effekte der Kopplung in die Berechnung der Resonanzfrequenz jedes Resonators eingehen.

Filterform, Bandbreite, Restwelligkeit und Rückflussdämpfung werden alle durch die Kopplungsfaktoren zwischen den Resonatoren eingestellt. Bei richtiger Abstimmung haben die Resonatoren fast keine Auswirkung auf die Filterform. Die einzige Ausnahme sind die Eingangs- und Ausgangsresonatoren, welche die Nennimpedanz des Filters einstellen. Normalerweise wird ein Eingangs- oder Ausgangstransformator verwendet, um an die gewünschte Impedanz anzupassen. Wenn die Resonatoren nicht richtig abgestimmt sind, wird die Rückfluss- und Einfügungsdämpfung nicht auf dem optimalen Niveau sein.

Da die Resonatoren miteinander gekoppelt sind, hat die Abstimmung eines Resonators die größte Wirkung auf die benachbarten Resonatoren, aber sie wird auch eine kleinere Wirkung auf die verbleibenden Resonatoren haben. Das Ausmaß des Effekts hängt vom Kopplungsfaktor ab. Mit diesen Informationen im Hinterkopf sind wir bereit, die neue Zeitbereichs-Tuning-Technik zu erkunden.

Zeitbereichsverhalten von simulierten Filtern

Um diese Abstimmungsmethode einzuführen, werden wir Simulationen verwenden um zu untersuchen, was mit der Zeitbereichsantwort eines abgestimmten Filters passiert. Wir beginnen mit einem relativ einfachen Filter: einem fünfpoligen gekoppelten Resonator Filter mit vier Koppelstrukturen, entworfen für eine Chebyshev-Antwort mit 0,25 dB Welligkeit im Durchlassbereich. In diesem Beispiel wird die Filterantwort mit der Mikrowellen-Design-Software Advanced Design System (ADS) von Agilent Technologies simuliert werden. Damit sind die genaue Werte des Filters bekannt. Die Frequenz-Sweeps werden im Simulator durchgeführt und die Ergebnisse werden auf den Vektornetzwerkanalysator (VNA) heruntergeladen, wo dann die Zeitbereichstransformation des Instruments die Auswirkungen der Filterabstimmung zeigen kann. Der Schaltplan für das Filter ist in Abbildung 1 dargestellt.

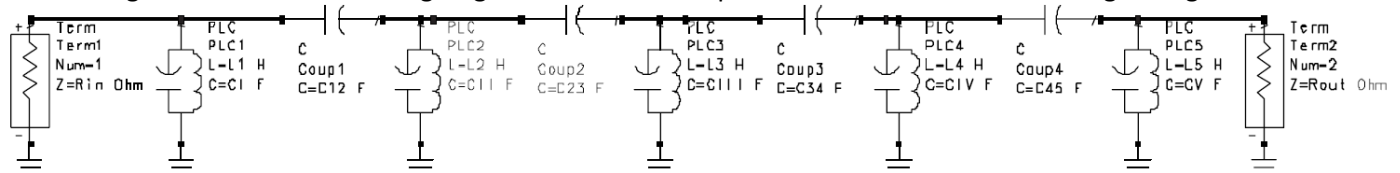


Abbildung 1. Schaltplan des fünfpoligen Filters mit gekoppelten Resonatoren

Um die Messung für die Zeitbereichsabstimmung einzurichten, MUSS der Frequenzdurchlauf auf die gewünschte Mittenfrequenz des Bandpassfilters zentriert sein. Dies ist kritisch, da die Abstimmungsmethode das Filter auf genau diese Mittenfrequenz abgestimmt. Als nächstes sollte die Darstellungsbandbreite (Span) auf ungefähr zwei- bis fünfmal der erwarteten Filterbandbreite eingestellt werden.

Abbildung 2 zeigt den Frequenzgang und die Zeitbereichs-Antwort des Filters. Beachten Sie die markanten Einbrüche der S11-Antwort des Filters im Zeitbereich. Diese sind charakteristische Nullen, die auftreten, wenn die Resonatoren genau abgestimmt sind. Die Spitzen zwischen den Nullen beziehen sich auf die Kopplungsfaktoren des Filters, wie wir

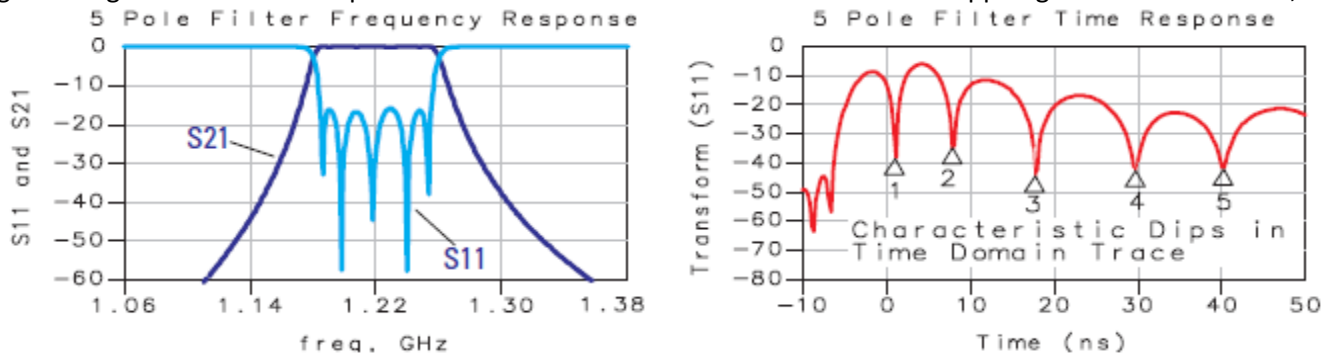


Abbildung 2. Die Frequenz- und Zeitantwort eines Bandpassfilters

später noch sehen werden. Die Markierungen 1 bis 5 wurden platziert, um die charakteristischen Einbrüche der entsprechenden Resonatoren 1 bis 5 im Filter zu zeigen. Allerdings sind da einige Einbrüche links der Markierung 1, die nicht zur Filterantwort gehören. Im Allgemeinen sind die Spitzen der Filterantwort viel höher als diejenigen im $t < 0$ -Bereich. Diese sind nicht aussagekräftig, und in der Regel wird der entsprechende Dip des ersten Resonators in der Nähe von $t = 0$ auftreten.

Auswirkung der Resonatorabstimmung

Das Beispielfilter beginnt mit den idealen Auslegungswerten, was die gewünschte Antwort liefert, da er per Definition korrekt abgestimmt ist. Um das Zeitverhalten bei der Abstimmung der Resonatoren zu verstehen, beobachten wir das Zeitverhalten, während wir die Resonatorbestandteile in der Simulation verändern (verstimmen). Abbildung 3 zeigt die Zeitverläufe für drei Zustände (die ideale Antwort ist in der helleren Kurve dargestellt). Die oberen Diagramme zeigen das Filter, bei dem der zweite Resonator um 2 % nach unten verstimmt ist. Beachten Sie, dass sich die erste Delle nicht verändert hat, die zweite Delle jedoch nicht mehr minimiert ist, und auch die folgenden Dellen nicht mehr. Wenn ein Resonator deutlich verstimmt ist (mehr als 1 %), überdeckt er die Dellen der nachfolgenden Resonatoren erheblich. Um den verstimmten Resonator zu identifizieren, suchen Sie daher nach der ersten Delle, die nicht mehr minimal ist. In diesem Fall sehen wir, dass eine Verstimmung des zweiten Resonators dazu führt, dass sich die zweite Nullstelle von ihrem Minimalwert entfernt.

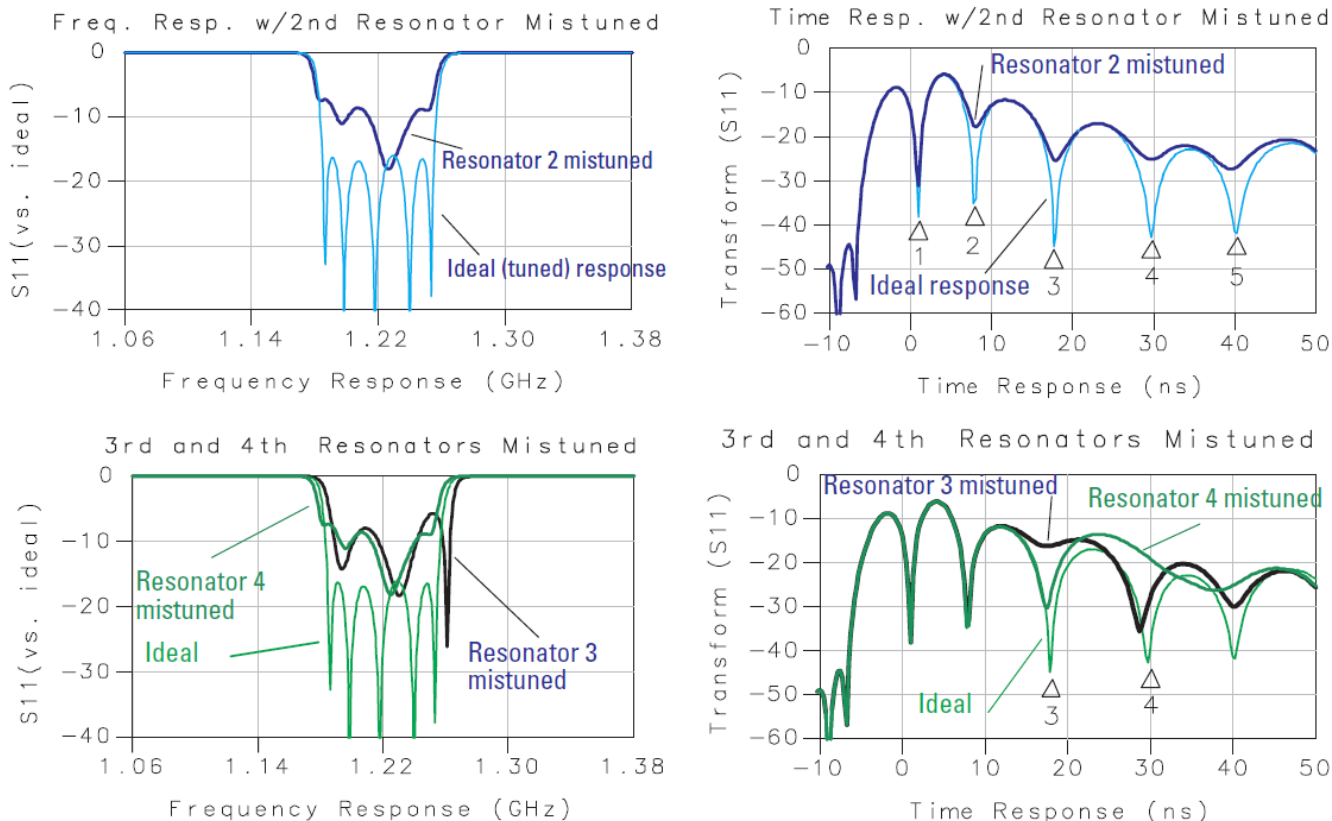


Abbildung 3. Die Reaktion eines Bandpassfilters auf die Abstimmung der Resonatoren

Die unteren Diagramme zeigen eine Antwort, bei der nur der dritte Resonator um 2 % nach oben verstimmt ist, und eine weitere, bei der nur der vierte Resonator um 2 % nach unten verstimmt ist. Auch hier lässt sich leicht erkennen, welcher Resonator verstimmt ist, indem man nach dem ersten Minimum sucht, das nicht mehr minimiert ist. Zusätzliche Simulationen haben gezeigt, dass die charakteristischen Minima nur dann minimiert werden, wenn die entsprechenden Resonatoren auf ihre korrekten Werte eingestellt sind. Jede Änderung der Abstimmung führt dazu, dass die Minima von den Minimalwerten ansteigen.

Der Schlüssel zu dieser Abstimmungstechnik liegt darin, die Resonatoren so einzustellen, dass jedes Minimum so niedrig wie möglich ist. Die Anpassung erfolgt weitgehend unabhängig, jedoch kann die Anpassung eines nachfolgenden Resonators dazu führen, dass das Minimum des vorherigen Resonators von seinem Minimum ansteigt, wenn alle Resonatoren beim ersten Durchlauf weit vom Endwert entfernt sind. In diesem Fall sollte das Minimum des vorherigen Resonators erneut optimiert werden. Sobald der nachfolgende Resonator abgestimmt und der vorherige optimiert ist, haben zusätzliche kleinere Anpassungen am zweiten Resonator nur noch einen sehr geringen Einfluss auf die dem ersten Resonator entsprechende Delle.

Wer mit den Auflösungsgrenzen von Zeitbereichsmessungen vertraut ist, weiß, dass die Zeitbereichsauflösung umgekehrt proportional zum gemessenen Frequenzbereich ist. Man fragt sich daher, wie es möglich ist, einzelne Resonatoren in einem Filter aufzulösen, wenn der Frequenzbereich nur das Zwei- bis Fünffache der Filterbandbreite beträgt. Anhang B erläutert den Zusammenhang zwischen der Zeitbereichstransformation und Bandpassfiltermessungen genauer. Abbildung 3 zeigt außerdem, dass der Frequenzgang von S11 bei Verstimmung von Resonator 2 nahezu identisch mit dem von S11 bei Verstimmung von Resonator 4 ist. Dies verdeutlicht, warum es schwierig sein kann, allein anhand der Frequenzbereichsmessungen zu bestimmen, welcher Resonator nachjustiert werden muss.

Auswirkung der Anpassung der Kopplungen

Während einfache Filter lediglich die Einstellung der Resonatoren erlauben, verfügen viele Filter auch über einstellbare Kopplungen. Um die Auswirkungen der Anpassung der Kopplung zu verstehen, betrachten wir erneut unser ursprünglich simulierten, „abgestimmten“ Filter. Zunächst untersuchen wir, was passiert, wenn wir den ersten Kopplungsfaktor um 10 % erhöhen. Abbildung 4 zeigt die S11-Antwort im Frequenz- und Zeitbereich vor und nach der Änderung des Kopplungsfaktors. Im Frequenzbereich sehen wir, dass die Filterbandbreite etwas größer ist und sich die Rückflussdämpfung verändert hat. Dies ist intuitiv verständlich, da eine Erhöhung der Kopplung bedeutet, dass mehr Energie das Filter passieren muss, was zu einer größeren Bandbreite führt.

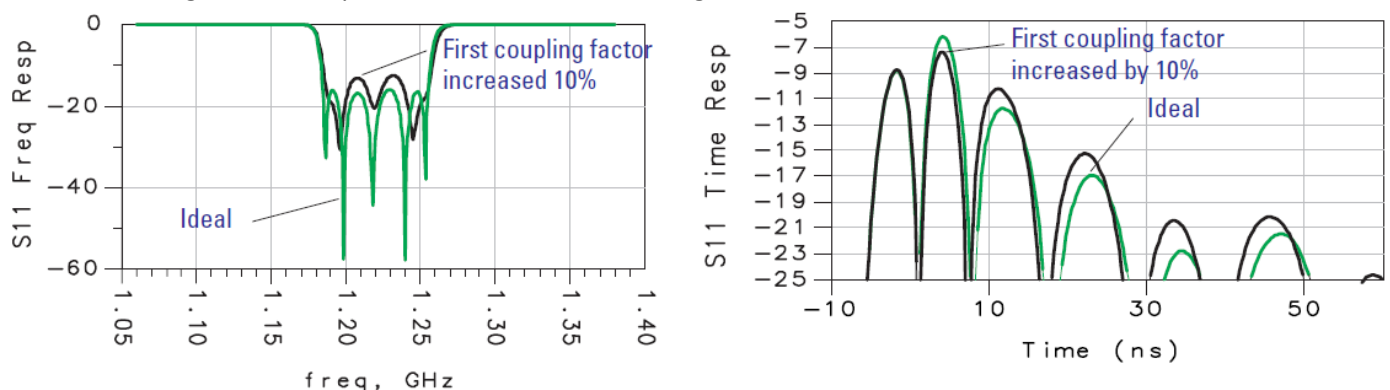


Abbildung 4. Auswirkung der Erhöhung des ersten Kopplungsfaktors (dunklere Kurve nach der Anpassung)

Im Zeitbereich ändert sich der erste Peak nicht, der zweite Peak ist jedoch kleiner. Obwohl es naheliegend erscheint, dass der erste Peak mit dem ersten Kopplungsfaktor zusammenhängt, ist zu beachten, dass dieser nach dem ersten Resonator im Filter liegt. Wir haben bereits gesehen, dass der erste Einbruch nach dem ersten Peak mit dem ersten Resonator in Verbindung steht. Es zeigt sich, dass der erste Peak mit der Eingangskopplung zusammenhängt, die in diesem Filter nicht angepasst wurde. Die Verringerung der Höhe des zweiten Peaks bei erhöhter Kopplung ist plausibel, da eine stärkere Kopplung bedeutet, dass mehr Energie an den nächsten Resonator gekoppelt wird. Dadurch wird weniger Energie reflektiert, und der Peak, der der reflektierten Energie dieser Kopplung entspricht, sollte abnehmen. Beachten Sie, dass die folgenden Peaks höher sind als zuvor. Durch die erste Kopplungsöffnung wurde mehr Energie eingekoppelt, sodass mehr Energie an den verbleibenden Kopplungsöffnungen reflektiert werden kann. Es ist wichtig zu erkennen, dass eine Änderung des ersten Kopplungsfaktors die Reaktionen aller nachfolgenden Peaks beeinflusst. Dies legt nahe, dass die Kopplungsfaktoren beginnend mit dem dem Eingang nächstgelegenen Kopplungsfaktor und anschließend in Richtung derer in der Mitte des Filters eingestellt werden sollten. Andernfalls kann eine falsch eingestellte Kopplung nahe dem Eingang die tatsächliche Reaktion der inneren Kopplungsfaktoren überdecken.

Betrachten wir nun, was passiert, wenn wir das ursprüngliche Filter nehmen und den zweiten Kopplungskoeffizienten um 10 % verringern. Abbildung 5 zeigt, dass im Frequenzbereich die Bandbreite des Filters leicht reduziert und die Rückflussdämpfung verändert wurde. Dies ist plausibel, da eine Verringerung der Kopplung bedeutet, dass weniger Energie das Filter passiert, was einer schmalen Bandbreite entspricht. Bei der Untersuchung des Zeitbereichssignals sehen wir keine Veränderung bei den ersten beiden Peaks, aber der dritte Peak ist höher, was damit übereinstimmt, dass aufgrund der verringerten Kopplung mehr Energie reflektiert wird. Da die Energiemenge, die an die folgenden Resonatoren und Aperturen gekoppelt wird, reduziert ist, sind die folgenden Peaks alle niedriger. Beachten Sie, wie gut die Zeitbereichsantwort die Auswirkungen der Änderung jeder Kopplung trennt und somit die individuelle Anpassung der Kopplungen ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist der Frequenzgang von S11 in Abbildung 4 dem in Abbildung 5 sehr ähnlich, sodass es sehr schwierig wäre, anhand des Frequenzgangs zu erkennen, welche Kopplung sich geändert hat.

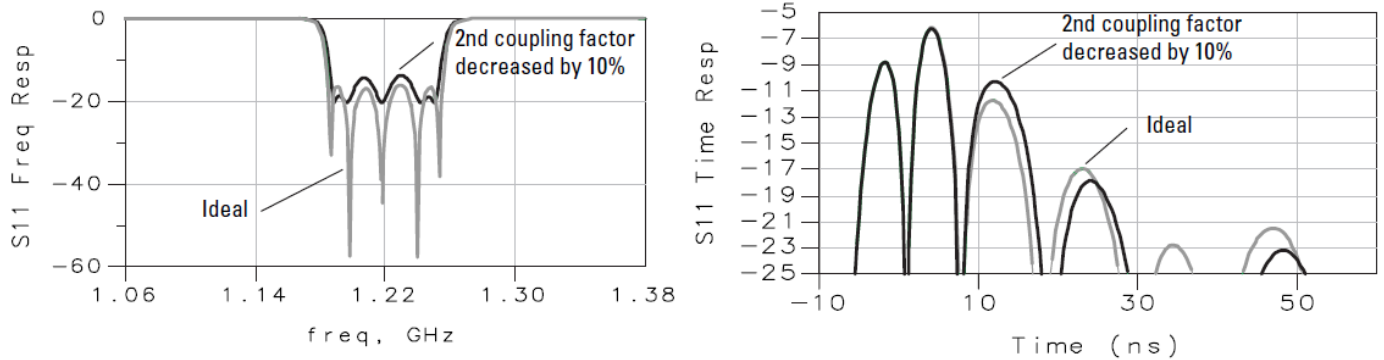


Abbildung 5. Auswirkung der Verringerung des zweiten Kopplungsfaktors (dunklere Kurve nach der Anpassung)

Wir haben also gesehen, dass der Kopplungsfaktor mit der Höhe der Reflexionsspur im Zeitbereich zwischen den einzelnen Resonatorminima in Zusammenhang steht. Die genaue Beziehung hängt auch vom Verhältnis der Filterbandbreite zum Frequenzdurchlauf ab, der zur Berechnung der Zeitbereichstransformation verwendet wird. Je größer der Frequenzdurchlauf (im Verhältnis zur Filterbandbreite), desto mehr Gesamtenergie wird reflektiert und desto höher sind die Peaks. Die Amplituden der Peaks sind schwer zu berechnen, da eine Änderung der Kopplung einer Stufe die Höhe der nachfolgenden Peaks verändert. Eine detaillierte Erklärung des Zusammenhangs zwischen der Zeitbereichsantwort und den Kopplungskoeffizienten geht über den Rahmen dieser Anwendungsbeschreibung hinaus. Auch wenn es nicht einfach ist, diese Peaks allein aus den Kopplungskoeffizienten zu berechnen, können die Aperturen direkt im Zeitbereich eingestellt werden, sobald die gewünschten Werte der Peaks bestimmt sind. Eine Methode zur Bestimmung der gewünschten Amplituden der Peaks besteht in der Verwendung einer Vorlage, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

Praktische Beispiele für das Abstimmen von Filtern

Nachdem wir nun den Zusammenhang zwischen der Abstimmung von Resonatoren bzw. Kopplungsöffnungen und den entsprechenden Ergebnissen im Zeitbereichsverhalten verstanden haben, können wir die Theorie in die Praxis umsetzen. Bei Multipol-Hohlraumfiltern mit festen Öffnungen genügt es, die charakteristischen Einbrüche im Zeitbereich abzustimmen, um eine optimale Filterabstimmung zu erreichen. Um ein Filter mit variablen Kopplungskoeffizienten abzustimmen, ist es am einfachsten, die Kopplung an einen Zielwert im Zeitbereich anzupassen. Dieser Zielwert im Zeitbereich kann für jeden Filtertyp auf verschiedene Weisen bestimmt werden. Eine Methode besteht darin, ein Referenzfilter zu verwenden, der die gleiche Struktur aufweist und für die gewünschte Filterform korrekt abgestimmt ist. Dieses Filter kann gemessen und die Daten im Speicher des Analysators abgelegt werden. Jedes weitere Filter kann so abgestimmt werden, dass er die gleiche Antwort erhält. Alternativ kann ein Filter mithilfe eines Simulationstools wie dem Agilent Advanced Design System erstellt werden. Die simulierte Antwort kann in den Netzwerkanalysator heruntergeladen und als Vorlage verwendet werden. Dies ist ein sehr effektiver Ansatz, da die Wahl der Filtertypen sehr flexibel ist. Zu beachten ist jedoch, dass jedes reale Filter Grenzen hinsichtlich der Güte (Q) der Resonatoren und des Abstimmbereichs der Kopplungsstrukturen und Resonatoren aufweist. Es ist wichtig, die Eigenschaften der Simulation mit den Einschränkungen der in den realen Filtern verwendeten Strukturen in Einklang zu bringen. In diesem Abschnitt beginnen wir mit der Einrichtung des Netzwerkanalysators zur Abstimmung von Bandpassfiltern im Zeitbereich und zeigen anschließend drei Beispiele, um die Abstimmung von Resonatoren und Kopplungen in realen Filtern zu veranschaulichen.

Einrichten des Netzwerkanalysators

Es ist unerlässlich, die Mittenfrequenz des Frequenzdurchlaufs des Analysators auf die gewünschte Mittenfrequenz des Filters einzustellen, da durch das Abstimmen des Filters im Zeitbereich die Mittenfrequenz des Filters auf diese Frequenz festgelegt wird. Wählen Sie einen Frequenzbereich, der das 2- bis 5-fache der Bandbreite des Filters beträgt. Ein zu schmaler Bereich bietet keine ausreichende Auflösung, um die einzelnen Abschnitte des Filters zu unterscheiden, während ein zu breiter Bereich dazu führt, dass zu viel Energie reflektiert wird, was die Abstimmungsempfindlichkeit verringert.

Der primäre zu messende Parameter ist S11 (Eingangsanpassung). Bei Zeitbereichsantworten jenseits der Mitte des Filters lassen sich die Antworten jedoch oft schwerer unterscheiden. Selbst bei verlustarmen Filtern kann es aufgrund von Verlusten im Filter zu erheblichen Unterschieden bei der Rückflussdämpfung zwischen Eingang und Ausgang kommen. Zudem tritt ein Maskierungseffekt auf, der dazu führt, dass Reflexionen von Kopplungen und Resonatoren, die weiter vom Eingang oder Ausgang entfernt sind, kleiner erscheinen, da ein Teil der einfallenden Energie durch frühere Reflexionen im Gerät verloren gegangen ist. Aus diesen Gründen ist die effektivste Art der Abstimmung, beide Seiten des Filters gleichzeitig zu betrachten; daher wird ein Netzwerkanalysator mit einem S-Parameter-Testsatz empfohlen. Zur Unterstützung der Abstimmung kann der Zweikanalmodus des Geräts genutzt werden, um die Rückflussdämpfung (S22) auf einem zweiten Kanal zu messen. Mit dieser Konfiguration stimmen Sie die erste Hälfte der Resonatoren und Kopplungen anhand der S11-Charakteristik ab und die verbleibenden anhand der S22-Charakteristik. Beachten Sie, dass Sie die Resonatoren und Kopplungsöffnungen ausgehend von dem Anschluss zählen müssen, an dem das Signal für diese Messung in das Filter eintritt. Für S11 würde somit der erste Einbruch dem Resonator entsprechen, der dem Eingangsanschluss des Filters am nächsten liegt. Für S22 würde der erste Einbruch dem Resonator entsprechen, der dem Ausgangsanschluss des Filters am nächsten liegt.

Für die Zeitbereichskonfiguration des Netzwerkanalysators muss der Bandpassmodus verwendet werden. Die Start- und Stoppzeiten müssen so eingestellt werden, dass die einzelnen Resonatoren erkennbar sind. Bei den meisten Filtern sollte die Startzeit etwas vor dem Zeitpunkt Null und die Stoppzeit etwas länger als das Doppelte der Gruppenverzögerung des Filters eingestellt werden. Ist die gewünschte Bandbreite bekannt, lassen sich die korrekten Einstellungen annähernd ermitteln, indem die Startzeit auf $t = -(2/\pi BW)$ und die Stoppzeit auf $t = (2N+1)/(\pi BW)$ gesetzt wird, wobei BW die erwartete Bandbreite des Filters und N die Anzahl der Filtersektionen ist. Dies sollte eine etwas längere Zeitbereichsantwort vor dem Beginn des Filters

und nach dem Ende der Filterzeitantwort ergeben. Wenn Sie die Abstimmung sowohl anhand der S11- als auch der S22-Antwort des Filters vornehmen, können Sie die Stoppzeit auf einen kleineren Wert einstellen, da Sie die S22-Antwort zur Abstimmung der Resonatoren verwenden, die zeitlich weiter entfernt (und näher am Ausgangsanschluss) liegen. Das für die Anzeige der Zeitbereichsantwort zu verwendende Format ist die logarithmische Amplitude (dB). Es kann hilfreich sein, den oberen Bildschirmrand auf 0 dB einzustellen.

Beispiel 1: Nur Resonatoren abstimmen

Das erste Beispiel ist ein einfacher fünfpoliger Hohlraumfilter mit festen Kopplungen, sodass nur die Resonatoren abgestimmt werden können, um die Mittenfrequenz anzupassen. Dieses Filter hat eine Mittenfrequenz von 2,414 GHz und eine 3-dB-Bandbreite von 12 MHz. Der Netzwerkanalysator ist auf dieselbe Mittenfrequenz und einen Messbereich von 50 MHz eingestellt. Im Zweikanalmodus werden sowohl S11 als auch S22 angezeigt. Die Zeitbereichsantwort ist so eingestellt, dass sie von -50 ns bis 250 ns durchlaufen wird. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es am besten ist, mit der Abstimmung an den Ein- und Ausgangsseiten zu

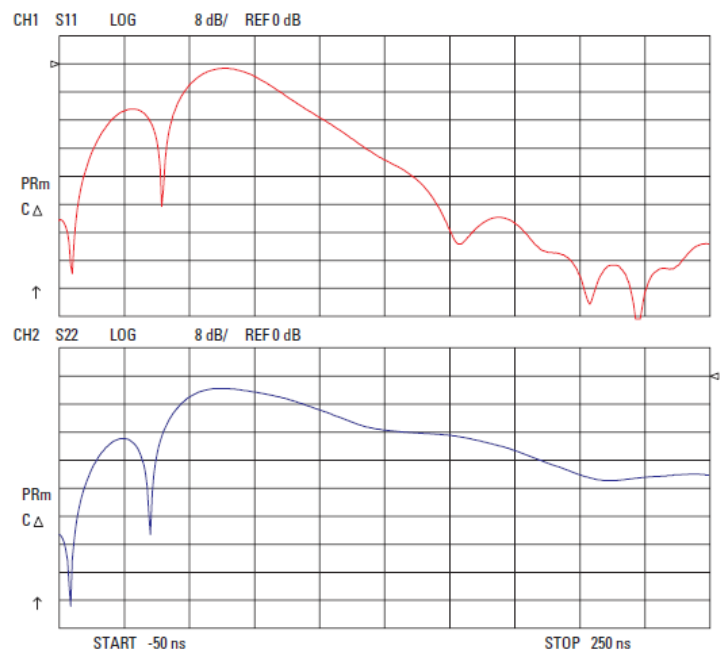


Abbildung 6. Zeitbereichsantwort eines 5-poligen Filters nach der Abstimmung der Resonatoren 1 und 5

beginnen und sich dann zur Mitte hin vorzuarbeiten. Abbildung 6 zeigt den Zeitbereichsgang, nachdem der erste und der fünfte Resonator so abgestimmt wurden, dass die tiefsten Einbrüche erzielt wurden. Beachten Sie, dass der erste Resonator, der dem Eingang am nächsten liegt, dem ersten Einbruch in S11 entspricht, während der fünfte Resonator, der in umgekehrter Richtung betrachtet der erste ist, dem ersten Einbruch in S22 entspricht. Diese Antworten veranschaulichen das Phänomen der Maskierung sehr gut. Auch wenn der fünfte Resonator korrekt abgestimmt ist, kann man dies anhand der S11-Antwort nicht erkennen. Ebenso kann man nicht erkennen, dass der erste Resonator abgestimmt ist, wenn man nur die S22-Antwort betrachtet.

Als Nächstes stimmen wir den zweiten Resonator ab und passen den ersten bei Bedarf an, um dessen Einbruch so gering wie möglich zu halten. Dann kehren wir zur Ausgangsseite zurück und stimmen den vierten Resonator ab, wobei wir den fünften bei Bedarf anpassen. Schließlich stimmen wir den dritten Resonator in der Mitte ab und passen den zweiten und vierten Resonator nach Bedarf an. Es kann erforderlich sein, zurückzugehen und jeden der Resonatoren erneut anzupassen, um die Antwort fein abzustimmen. Abbildung 7 zeigt die Zeitbereichsantwort nach der Abstimmung des Filters. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Reflexions- und Transmissionsantworten im Frequenzbereich. Beachten Sie, dass die Mittenfrequenz präzise auf 2,414 GHz eingestellt wurde, ohne während der Abstimmung den Frequenzbereich zu betrachten. Bei Abstimmverfahren im Frequenzbereich ist es oft möglich, das Filter so abzustimmen, dass es die richtige Form aufweist, während die Mittenfrequenz leicht abweicht. Das Abstimmverfahren im Zeitbereich zentriert das Filter sehr genau.

Was passiert nun, wenn wir die Mittenfrequenz des Filters ändern möchten, beispielsweise auf 2,42 GHz? Wir müssen lediglich den Abstimmvorgang wiederholen, wobei die Mittenfrequenz des Analysators auf die neue Frequenz eingestellt ist. Abbildung 10 zeigt den Zeitbereichsgang (in Fettdruck), der sich aus der Messung des 2,414-GHz-Filters nach der Änderung der Mittenfrequenz des Netzwerkanalysators auf 2,42 GHz ergibt. Die ursprüngliche Zeitbereichsantwort ist in der helleren Kurve dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Resonator-Tiefpunkte nicht mehr an ihren Minima liegen, sodass die Resonatoren neu abgestimmt werden müssen. Die Anpassung der Resonatoren zur erneuten Minimierung der Tiefpunkte führt zu einem Filter, der auf eine Mittenfrequenz von 2,42 GHz abgestimmt ist.

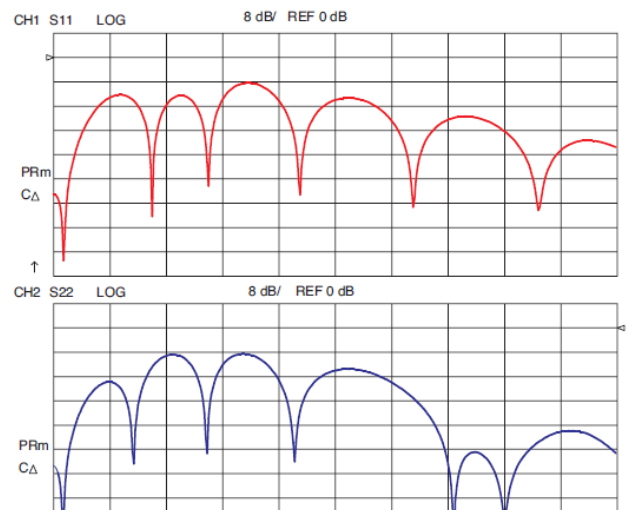


Abbildung 7. Zeitbereichsantwort eines 5-poligen Filters nach der Abstimmung aller Resonatoren

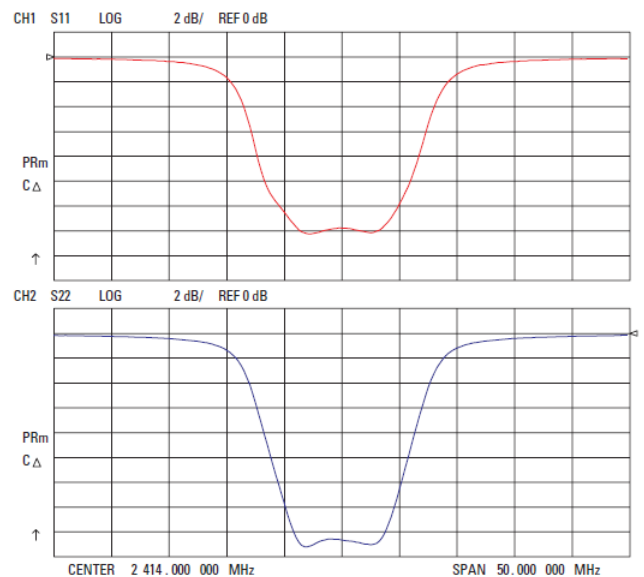


Abbildung 8. Endgültiger Frequenz-Verlauf der Reflexion

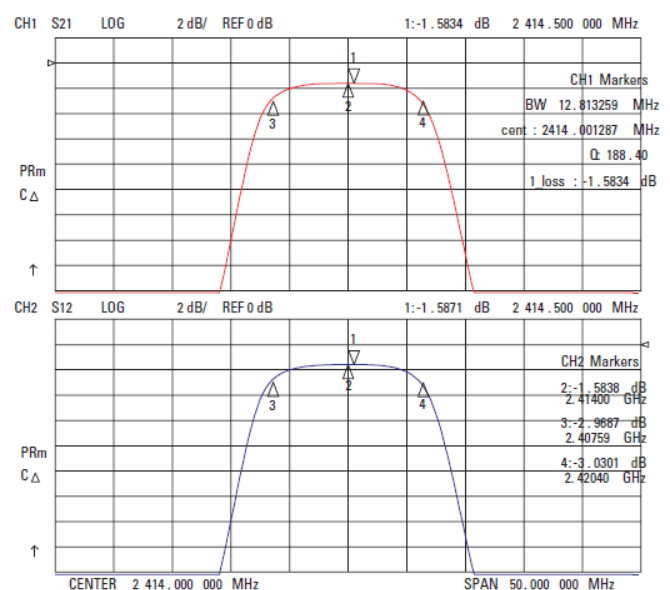


Abbildung 9. Endgültiger Frequenz-Verlauf der Transmission

Beispiel 2: Abstimmung auf ein „goldenens“ Filter

Das zweite Beispiel verwendet ein Filter mit acht Polstellen und sieben abstimmbaren Zwischen-Kopplungsstrukturen sowie Eingangs- und Ausgangskopplung. In der folgenden Erörterung verwenden wir einen „goldenens“ Filter, der von einem erfahrenen Ingenieur abgestimmt wurde, um den gewünschten Frequenzgang und die gewünschte Rückkopplungsdämpfung zu erzielen. Ein zweites, nicht abgestimmtes Testfilter, dargestellt in Abbildung 11, wurde als Testbeispiel verwendet. Abbildung 12 zeigt die Zeit- und Frequenzbereichsdiagramme beider Filter. Ein Vier-Parameter-Anzeigemodus wird verwendet, um sowohl S11 als auch S22 (Eingangs- und Ausgangs-Rückflussdämpfung) im Zeit- und Frequenzbereich darzustellen.

Das Testfilter wurde vorab abgestimmt, indem die Kopplungsschrauben (die langen Schrauben auf dem Bild) auf etwa die gleiche Höhe wie beim „goldenens“ Filter eingestellt wurden. Eine solche Vorabstimmung wird üblicherweise durchgeführt, um die Kopplungen vor Beginn der eigentlichen Abstimmung näher an den korrekten Wert heranzuführen; sie funktioniert jedoch nicht in Situationen, in denen kein zuvor abgestimmtes Filter zur Verfügung steht. Der erste Schritt bei der Abstimmung dieses Filters besteht darin, anzunehmen, dass die Zwischenstufenkopplung nahezu korrekt ist, und die Resonatoren so einzustellen, dass das Filter optimal abgestimmt wird, ohne die Kopplungsschrauben zu verstellen. Die Einstellung für dieses Filter ist eine Mittenfrequenz von 1220 MHz und eine Bandbreite von etwa 320 MHz. Die Filterbandbreite beträgt etwa 80 MHz, daher wird der Zeitbereich zunächst von etwa -8 ns ($-2/\pi BW$) bis etwa 70 ns ($((2N+1)/\pi BW)$) eingestellt. Nach der ersten Abstimmung erweisen sich -20 ns und 80 ns als gute Wahl für die Zeiteinstellungen.

In Anlehnung an Beispiel 1 werden alle acht Resonatoren abgestimmt, beginnend mit den beiden äußeren Resonatoren und fortfahrend, bis die mittleren Resonatoren abgestimmt sind. Jeder wird so abgestimmt, dass die Resonanz minimiert wird (d. h. der tiefste Einbruch erzielt wird). Wieder beginnen wir damit, zunächst die beiden äußeren Resonatoren (Nummer eins und acht) abzustimmen, wobei wir sowohl S11 als auch S22 betrachten, und stimmen sie dann neu ab, nachdem die nächsten inneren Resonatoren (zwei und sieben) abgestimmt sind. Nachdem der dritte Satz Resonatoren abgestimmt ist (drei und sechs), werden die zweiten Resonatoren (zwei und sieben) neu abgestimmt. Dies wird noch einmal für den vierten und fünften Resonator wiederholt. Nachdem diese anfängliche Abstimmung abgeschlossen ist, weist das Filter einen sehr

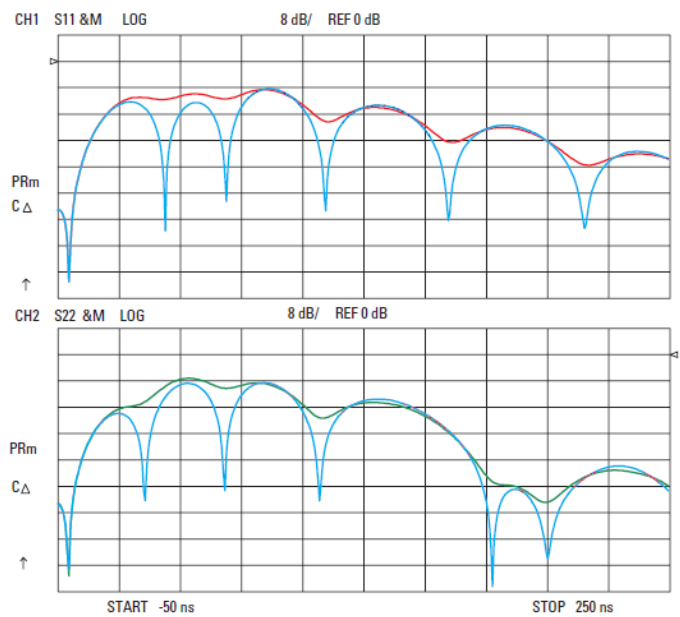


Abbildung 10. Zeitbereichsantwort bei geänderter Mittenfrequenz

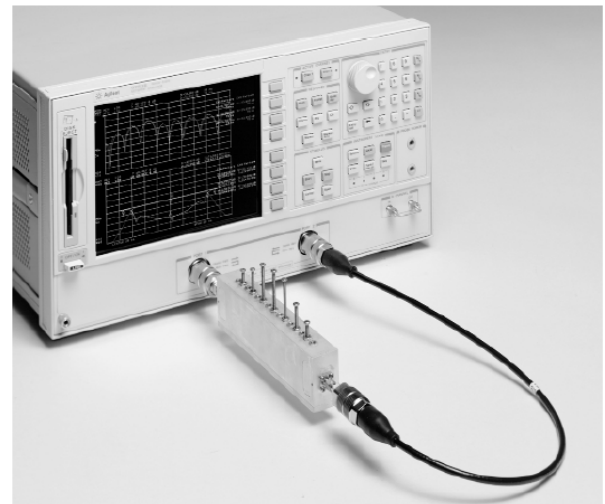


Abbildung 11. Achtpoliges Filter mit sieben Durchlässen, verwendet für die Beispiele 2 und 3

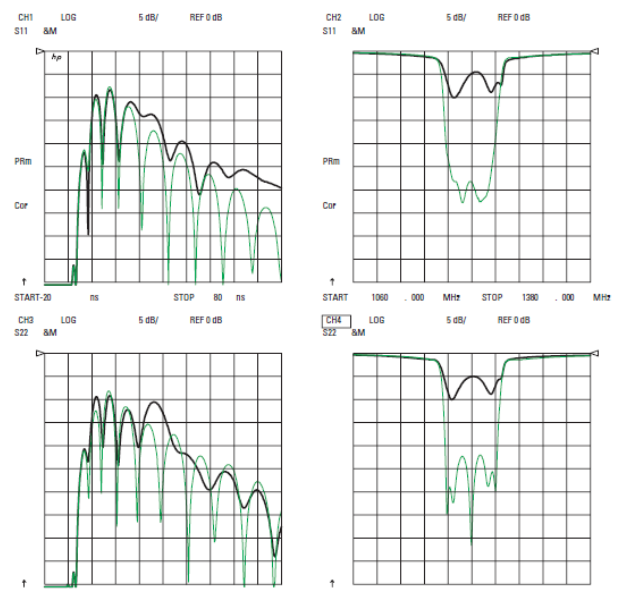


Figure 12. Die Frequenzgangkurve eines „goldenens“ Filters (hellere Kurve) und eines nicht abgestimmten Filters desselben Typs (dunklere Kurve)

schönen Frequenzgang auf (Abbildung 13), der jedoch nicht der gewünschten Antwort entspricht. Nun ist es an der Zeit, die Kopplungsstrukturen abzustimmen.

Um die Kopplungsstrukturen abzustimmen, kann der Maßstab so geändert werden, dass die Spitzen der Zeitbereichsantwort gut erkennbar sind. In diesem Beispiel wird die Vier-Parameter-Anzeigefunktion genutzt, um den Zeitbereich im Vollbildmodus mit einer Nahaufnahme der Spitzen darzustellen. Mit dieser Anzeige lassen sich sowohl die Spitzen als auch die Einbrüche leichter einstellen. Um die Kopplung abzustimmen, beginnen Sie mit der Abstimmung der Kopplungsöffnungen, die dem Ein- und Ausgang des Filters am nächsten liegen, und arbeiten Sie sich zur Mitte vor, um Maskierungseffekte durch falsch abgestimmte äußere Kopplungen zu vermeiden. Drehen Sie die Schraube hinein, um die Kopplung zu erhöhen (den Peak zu verringern). Nachdem jede Kopplungsschraube eingestellt ist, justieren Sie die Resonatoren auf jeder Seite neu, um das Tal so niedrig wie möglich zu machen, beginnend von außen und nach innen arbeitend. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis nach dem ersten Durchgang der Einstellung der Kopplungsstrukturen und Resonatoren von außen nach innen.

Beispiel 3: Verwendung simulierter Ergebnisse als Vorlage

Die Verwendung einer simulierten Filterantwort zur Erstellung einer Vorlage für die Filterabstimmung bildet die Grundlage für das abschließende Beispiel zur Filterabstimmung. Es wird ein idealer achtpoliger Tschebyscheff-Filter simuliert, wobei für die Bandbreite und die Welligkeit beliebige Werte gewählt werden können. Für dieses Filter wurde eine größere Bandbreite mit höherer Welligkeit gewählt. Wir werden versuchen, dasselbe Filter wie in Beispiel 2 abzustimmen, um diese neue Filtercharakteristik zu erhalten. Da das Beispielfilter

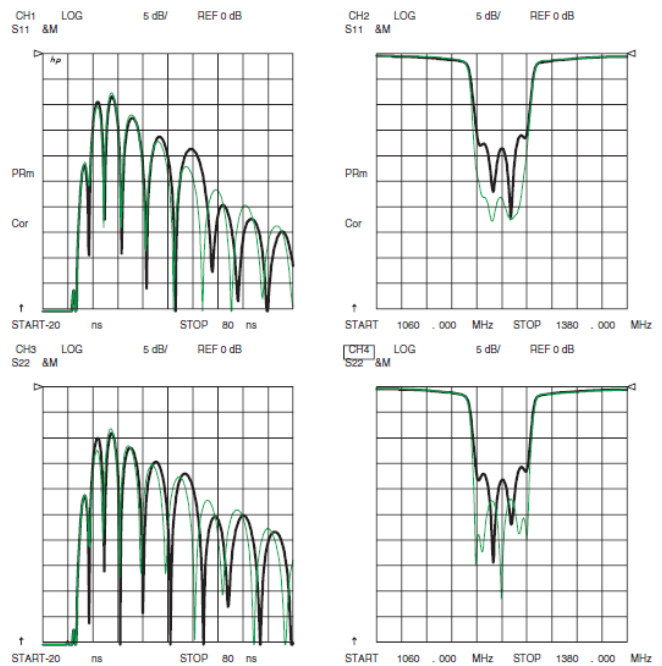


Abbildung 13. Die Reaktion eines „goldenen“ Filters (hellere Kurve) und eines Filters, bei dem nur die Resonatoren

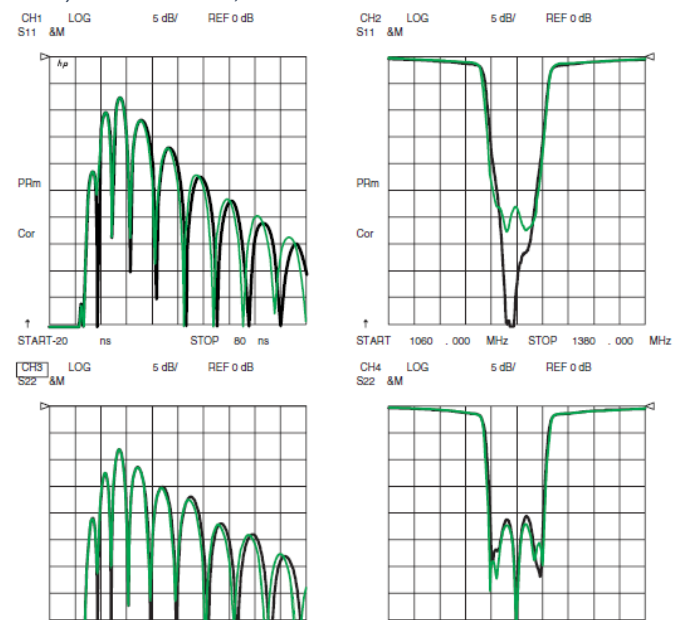


Abbildung 14. Die Reaktion eines „goldenen“ Filters (hellere Kurve) und eines weiteren Filters, bei dem sowohl die Kopplungen als auch die Resonatoren abgestimmt sind (dunklere Kurve)

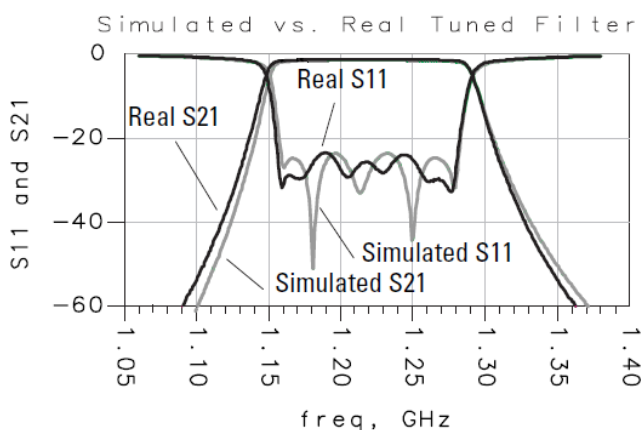
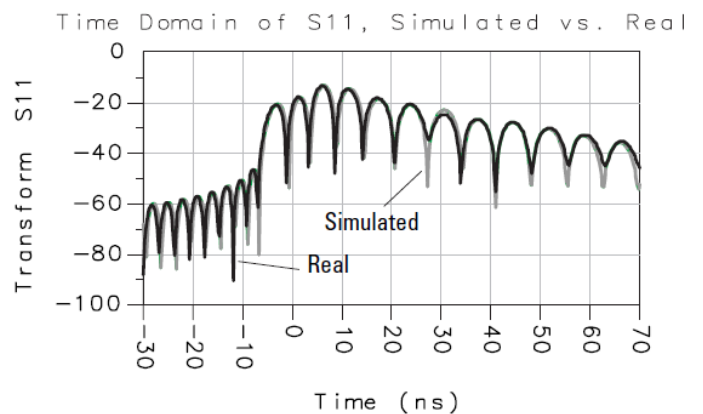


Abbildung 15. Ein Beispiel für ein simuliertes Filter und ein reales Filter, das auf den Frequenzgang abgestimmt ist.



keine einstellbare Eingangs- und Ausgangskopplung aufweist, gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Filtercharakteristik, die erreicht werden kann. In diesem Fall wurde die Bandbreite festgelegt, und es wurde ein

Rückflussdämpfungswert gewählt, der denselben Wert für die Eingangskopplung im Zeitbereich ergibt wie der des Beispielfilters. Der Frequenzgang der Simulation wurde in den Netzwerkanalysator geladen und als Vorlage verwendet. In der Simulation wurde den Resonator-Strukturen ein Verlust hinzugefügt, um den Gesamtverlust des realen Filters zu approximieren. Dadurch passen die S11- und S22-Werte aus der Simulation besser zur tatsächlichen Zeitbereichsantwort des Filters. Die Auswirkungen des Verlusts werden im nächsten Abschnitt ausführlicher behandelt.

Jede Kopplung und jeder Resonator werden so abgestimmt, dass sie denselben zeitlichen Verlauf wie das simulierte Vorbild aufweisen, wobei das in Beispiel 2 beschriebene Verfahren befolgt wird. Die letzte Kopplungsstruktur ist nicht abstimmbare, liegt jedoch nahe genug am Idealwert, um eine Verzerrung des Gesamtverlaufs zu vermeiden. Abbildung 15 zeigt das Ergebnis mit der simulierten Kurve und dem endgültig abgestimmten Filter. Die Ergebnisse liegen bemerkenswert nahe beieinander, wenn man bedenkt, dass das Filter nur im Zeitbereich abgestimmt wurde und dass die Simulation kapazitiv gekoppelte konzentrierte Elemente verwendete, während das reale Filter magnetisch gekoppelte verteilte Elemente aufwies. Mit dieser Technik kann praktisch jede simulierbare Filterform als Vorlage für ein reales Filter dienen, der einfach und deterministisch abgestimmt werden kann, solange die Filterelemente über die nötige Abstimmungsflexibilität verfügen. Selbst unerfahrene Abstimmer können dieser einfachen Abstimmungstechnik folgen, da jede Kopplungs- und Resonatorstruktur im Zeitbereich unterschieden werden kann.

Effekte von Verlusten in Filtern

Zuvor wurde darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung von Simulationen zur Erzeugung der Zeitbereichskurve die Auswirkungen von Verlusten berücksichtigt werden müssen. Ein verlustbehaftetes Filter weist in der Zeitbereichskurve Spitzenwerte auf, die niedriger sind als die eines verlustfreien Filters, und die Unterschiede in den Spitzenpegeln sind bei den Öffnungen, die weiter im Filter liegen, größer. Daher führt die Abstimmung eines verlustbehafteten Filters auf eine Vorlage, die auf der Simulation eines verlustfreien Filters basiert, wahrscheinlich zu falschen Einstellungen der Kopplungsfaktoren.

Der Versuch, die Kopplungsöffnungen im verlustbehafteten Filter so einzustellen, dass sie der Vorlage eines verlustfreien Filters entsprechen, erfordert eine Erhöhung der Spitzen in der Zeitbereichskurve über den richtigen Wert hinaus, sodass die Kopplung reduziert werden muss, um mehr Reflexion zu erzielen. In der Regel ist es nicht möglich, alle Spitzen anzugleichen, insbesondere die für die Öffnungen, die weiter im Filter liegen, da, wie wir zuvor in Abbildung 5 beobachtet haben, die Verringerung eines Kopplungsfaktors dazu führt, dass die entsprechende Spitze ansteigt, die folgenden Spitzen jedoch alle abnehmen.

Im Frequenzbereich führt dies dazu, dass man zwar möglicherweise eine ähnliche Rückflussdämpfung erzielen kann, das Filter jedoch aufgrund der höheren Reflexion schmaler ausfällt, wie in Abbildung 16 dargestellt.

In vielen Fällen kann der Filterverlust vernachlässigt werden, doch bei Filtern höherer Ordnung kann es erforderlich sein, den Verlust jedes Resonators in das Modell einzubeziehen. Außerdem erlauben zwar viele Simulatoren die Anwendung von Verlusten auf Filterformen, verteilen diese Verluste jedoch nicht über das gesamte Filter. Um

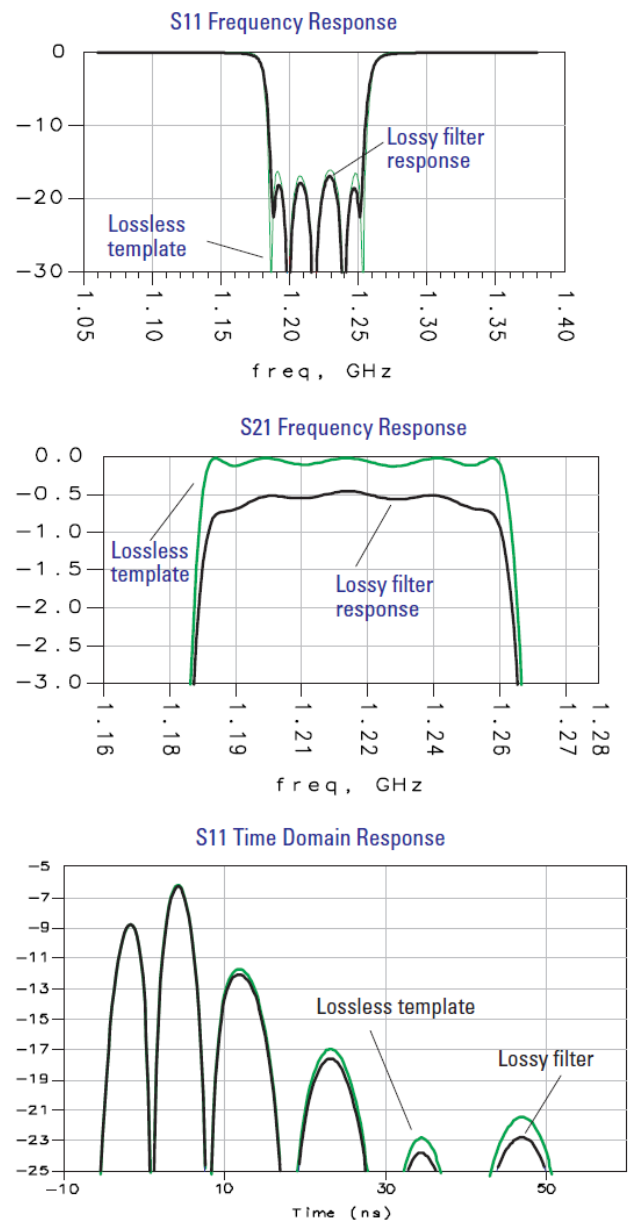


Abbildung 16. Vergleich von verlustlosen zu verlustbehafteten Filtern

Verluste angemessen zu berücksichtigen, kann es daher notwendig sein, eine Filterstruktur zu erstellen, die verlustbehaftete Resonatoren mit diskreter Kopplung dazwischen verwendet.

Um die Rückflussdämpfung eines Filters an eine verlustfreie Filtersimulation anzupassen, kann es erforderlich sein, ein verlustbehaftetes Filter vorwiegend von der S11-Seite (Eingangsseite) aus abzustimmen. Der Verlust des Filters führt dazu, dass sich die S22-Zeitbereichsantwort von der S22 eines verlustfrei simulierten Filters unterscheidet. Da die Vorwärtsreflexion und -transmission (S11 und S21) in den meisten Fällen wichtiger sind, führt die Abstimmung von der S11-Seite zu besseren Ergebnissen.

Wenn eine Vorlage für ein verlustfreies Filter verwendet werden muss, müssen Sie möglicherweise die Kopplungsöffnungen so anpassen, dass sie nicht genau mit den Spitzen übereinstimmen; das heißt, sie sollten etwas tiefer liegen, um den Verlust im Filter auszugleichen.

Komplexere Filter

Kreuzgekoppelte Filter

Schließlich sind viele Filter komplexer als die herkömmlichen Allpolfilter. Hohlraumresonatorfilter weisen oft eine „Kreuzkopplung“ auf, die effektiv eine oder mehrere Übertragungsnullstellen hinzufügt, ähnlich wie bei einem elliptischen Filter. Wenn diese Nullstellen, die sehr enge Isolationsbereiche im Durchlassbereich der Antwort erzeugen, nahe an den Rändern des Filterdurchlassbereichs liegen, können sie die Filterantwort im Zeitbereich so verzerren, dass sie keine tiefe Nullstelle mehr aufweist, die mit dem Resonator in der Nähe der Struktur assoziiert ist, die die Nullstelle erzeugt. Im Allgemeinen können die Resonatoren, die nicht kreuzgekoppelt sind, immer noch mit der zuvor beschriebenen Nulldarstellungstechnik abgestimmt werden. Aber wie verhält es sich mit den kreuzgekoppelten Resonatoren?

Einige Filter weisen Übertragungsnullstellen auf, die symmetrisch sind, wie in Abbildung 17 dargestellt; die Reaktion der Nullstellen ist auf beiden Seiten des Durchlassbereichs zu erkennen. Diese Filter lassen sich in der Regel mit den zuvor beschriebenen Methoden abstimmen. Die Symmetrie der Nullstellen hält die kreuzgekoppelten Resonatoren auf ungefähr derselben Frequenz wie die anderen Resonatoren, sodass alle Resonatoren nahe an ihre korrekten Werte abgestimmt werden können, indem man auf tiefe Nullstellen im Zeitbereichsgang abstimmt.

Möglicherweise ist eine Feinabstimmung erforderlich, entweder durch Abstimmung im Frequenzbereich oder durch Anwendung der Techniken, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

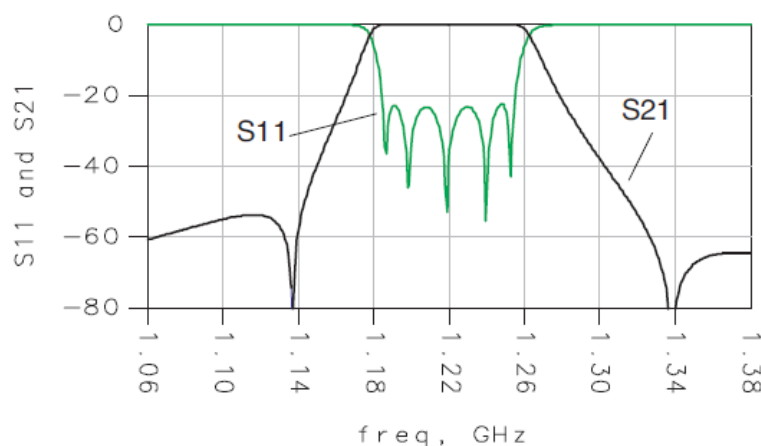


Abbildung 17. Durchlass- und Reflexionsverhalten eines Filters mit symmetrischen Durchlassnullstellen

Bei Filtern mit asymmetrischen Nullstellen, wie in Abbildung 18 dargestellt, weisen die kreuzgekoppelten Resonatoren nicht dieselbe Frequenz auf wie die anderen Resonatoren, sodass die Einbrüche im Zeitbereichsdiagramm, die diesen Resonatoren entsprechen, nicht minimiert werden, wenn die Mittenfrequenz des Netzwerkanalysators auf die Mittenfrequenz des Filters eingestellt ist.

Das Abstimmen der Resonatoren auf eine Vorlage führt möglicherweise nicht zur korrekten Antwort, da es mehr als eine Einstellung der Abstimmsschraube gibt, die die gleiche Amplitudenantwort ergeben kann. Erinnern Sie sich daran, dass wir bei der Erörterung der Zeitbereichsantwort eines simulierten Filters festgestellt haben, dass eine zu hohe oder zu niedrige Abstimmung des Resonators dazu führt, dass der Einbruch vom Minimalwert ansteigt. Die Einstellung ist nur dann eindeutig, wenn Sie auf eine Nullstelle abstimmen. Wir können jedoch die Filterabstimmungstechnik im Zeitbereich entsprechend anpassen.

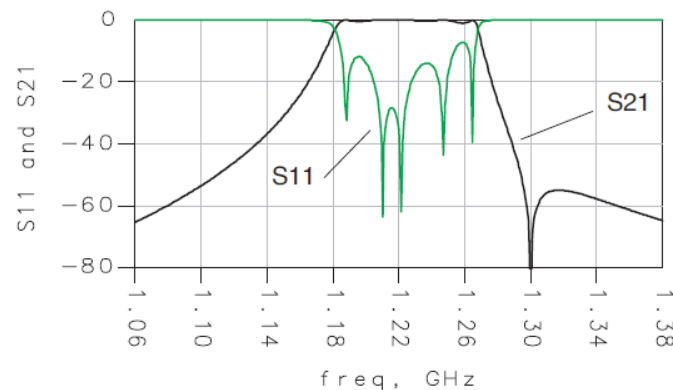


Abbildung 18. Durchlass- und Reflexionsverhalten eines Filters mit unsymmetrischen Durchlassnullstellen

Erinnern wir uns daran, dass die von uns untersuchten Allpolfilter Resonatoren aufweisen, die alle auf dieselbe Frequenz abgestimmt sind, wobei die Auswirkungen der Kopplung berücksichtigt sind. Wir stellen die Mittenfrequenz des Netzwerkanalysators auf diese Frequenz ein, und wenn wir uns die Reflexionsantwort im Zeitbereich ansehen, erhalten wir Nullstellen, die jedem Resonator entsprechen, wenn dieser Resonator auf die Mittenfrequenz des Analysators eingestellt ist. Bei Filtern mit asymmetrischen Antworten sollten wir, wenn wir die korrekte Frequenz der gekoppelten Resonatoren bestimmen können, in der Lage sein, die Mittenfrequenz des Analysators auf diesen neuen Wert einzustellen und die dem gekoppelten Resonator entsprechende Senke auf ihren Minimalwert abzustimmen, um den Resonator richtig abzustimmen. Die Herausforderung besteht nun darin, die korrekte Frequenz der gekoppelten Resonatoren zu bestimmen.

Eine Möglichkeit besteht darin, die richtige Frequenz mathematisch auf der Grundlage des Filterentwurfs zu berechnen. Simulationstools können hierfür sehr nützlich sein. Eine alternative Methode ist die empirische Ermittlung der Informationen mithilfe eines „Golden“- oder Vorlagenfilters. Sie können den Analysator so einrichten, dass auf einem Kanal ein Frequenzdurchlauf und auf einem anderen Kanal die Zeitbereichsantwort angezeigt wird. Identifizieren Sie die Senke in der Zeitbereichskurve, die dem gekoppelten Resonator entspricht. Beobachten Sie die Veränderung dieser Senke, während Sie die Mittenfrequenz des Analysators langsam variieren. Sie sollten sehen, dass die Senke ein Minimum erreicht, wenn die Mittenfrequenz des Analysators auf die richtige Frequenz für diesen Resonator eingestellt ist. Verwenden Sie diese Informationen, um einen neuen Instrumentenzustand für die Abstimmung dieses bestimmten Resonators einzurichten. Alle Resonatoren, die nicht gekoppelt sind, müssen wahrscheinlich weiterhin abgestimmt werden, wobei die Mittenfrequenz des Analysators auf die Mittenfrequenz des Filters eingestellt ist. Je nach Kopplung kann ein gekoppelter Resonator jedoch auch die Frequenz seiner benachbarten Resonatoren leicht von der Mittenfrequenz des Filters abweichen lassen, sodass Sie möglicherweise die richtigen Frequenzen für einige der benachbarten Resonatoren ebenfalls mit dieser Methode ermitteln.

Im Allgemeinen hat die Kreuzkopplung keinen großen Einfluss auf die Abstimmung der Kopplungen, da der Grad der Kreuzkopplung in der Regel gering ist und nur minimale Auswirkungen auf die Spitzen im Zeitbereich der Antwortkurve hat, die den Kopplungsöffnungen entsprechen. Für Filter mit gekoppelten Resonatoren lautet die empfohlene Abstimmungsreihenfolge:

1. Beginnen Sie mit vorab abgestimmten Kopplungsschrauben (um die physikalischen Einstellungen eines „Golden“ Filters zu erreichen), wie in Beispiel 2 beschrieben.
2. Stellen Sie die Mittenfrequenz des Analysators auf die Mittenfrequenz des Filters ein und stimmen Sie alle Resonatoren so ab, dass die Einbrüche minimiert werden, um alle Resonatoren nahe an die richtigen Einstellungen zu bringen, wobei Sie den Fehler bei den gekoppelten Resonatoren vorerst ignorieren.

3. Stimmen Sie die Kopplungsöffnungen so ab, dass die Zeitbereichsantwort mit den Vorlagenwerten übereinstimmt.
4. Kehren Sie zurück und nehmen Sie eine Feineinstellung der kreuzgekoppelten Resonatoren sowie aller anderen Resonatoren vor, die auf eine andere Frequenz als die Mittenfrequenz des Filters abgestimmt werden müssen.

Duplexer

Das Abstimmen von Duplexern im Zeitbereich kann ein Problem darstellen, wenn die Durchlassbereiche zu nahe beieinander liegen. Wenn die Durchlassbereiche durch mindestens eine Bandbreite voneinander getrennt sind und Sie den Analysator auf eine Spanne von mindestens dem Zweifachen der Bandbreite einstellen können, ohne das andere Filter zu sehen, sollten Sie in der Lage sein, den Duplexer mit den in diesem Anwendungshinweis beschriebenen Techniken abzustimmen. Liegen die Durchlassbereiche näher als eine Bandbreite auseinander, kommt es zu Interferenzen durch die Antwort des anderen Filters, und Sie können die Antworten der einzelnen Resonatoren im Zeitbereich möglicherweise nicht klar unterscheiden. In diesem Fall können Sie das Filter möglicherweise teilweise im Zeitbereich abstimmen, benötigen jedoch eine andere Methode, um die Abstimmung abzuschließen.

Viele Duplexer verfügen über gemeinsame Elemente (einen oder mehrere Resonatoren) im Antennenpfad, die Teil der Antwort sowohl für den Tx-Ant- als auch für den Ant-Rx-Pfad bilden. Um diese Resonatoren abzustimmen, kann es erforderlich sein, ihre Frequenzen auf die Mittenfrequenz zwischen dem Rx- und dem Tx-Band einzustellen, anstatt sie auf die Mittenfrequenz eines der beiden Durchlassbereiche abzustimmen.

Sowohl kreuzgekoppelte Resonatorfilter als auch Duplexer sind fortgeschrittenere Themen, die weitere Recherchen erfordern. Eine weitere Verfeinerung der Zeitbereichs-Filterabstimmungstechniken für den Umgang mit solchen Filtern befindet sich derzeit in der Entwicklung.

Fazit

Zwar wurden bereits verschiedene Techniken zur Vereinfachung des Filterabstimmungsprozesses erprobt, doch bisher war keine davon vollständig erfolgreich, da Filter mit gekoppelten Resonatoren von Natur aus resistent gegen Techniken sind, die Eigenschaften wie Kopplungswechselwirkungen nicht berücksichtigen können. Die in diesem Anwendungshinweis beschriebene Methode trägt wesentlich zur Lösung dieses Problems bei. Sie ermöglicht es, Kopplungsöffnungen so abzustimmen, dass sie jeder Filterform innerhalb ihres Abstimmbereichs entsprechen, und Resonatoren so einzustellen, dass ein perfekt abgestimmtes Filter entsteht, wobei Wechselwirkungen sofort erkennbar sind und korrigiert werden können.

Zwar ist ein besseres Verständnis bestimmter Filtertypen wie beispielsweise kreuzgekoppelter Filter erforderlich, doch zeigt diese Technik bereits genug Potenzial, um Filter so einfach abzustimmen, dass der aktuelle Trend zur Automatisierung der Filterabstimmung in der Fertigungslinie möglicherweise nicht mehr notwendig ist. Alternativ könnte diese Abstimmung im Zeitbereich die Automatisierung zum ersten Mal praktikabel machen. Sie erleichtert es auf jeden Fall, unerfahrene Filterabstimmer schnell einzuarbeiten. Allein diese Eigenschaften machen die Technik der Implementierung und weiteren Untersuchung würdig.

Literaturverzeichnis

The Fourier Transform and Its Applications, second edition, Ronald N. Bracewell, McGraw-Hill, 1978.

Electronic Filter Design Handbook, (Chapter 5), Williams and Taylor, McGraw-Hill, 1988.

Filtering in the Time and Frequency Domains, Blinichikoff and Zverev, John Wiley & Sons, 1976.

“Simplify Filter Tuning in the Time Domain,” Joel Dunsmore, *Microwaves and RF*, March 1999, pp. 68-84