

# Agilent Netzwerkanalyse-Lösungen

## Fortschrittliche Filteroptimierung mithilfe der Zeitbereichstransformation

### Einführung

Das Maß an Erfahrung und Know-how, welches erforderlich ist, um gekoppelte Resonator-Filter, kreuz-gekoppelte Filter und Duplexer präzise abzustimmen, schließt diese Geräte von der schnellen Massenproduktion aus. Ironischerweise sind gerade diese Filter in zunehmend großen Mengen durch die spektrale Dichte infolge des unerwarteten Erfolgs der drahtlosen Kommunikationsdiensten erforderlich. Der Zeitbedarf für das genaue Abstimmen dieser Filter begrenzt die Hersteller in der Erhöhung ihrer Produktionsmengen und der Reduzierung der Kosten. Glücklicherweise ist es möglich, sowohl den Zeitaufwand für die Abstimmung wie auch die Erfahrung und das Know-how für diese Art von Filter drastisch zu reduzieren. Die Methode verbannt das Abstimmen von Filtern aus dem Reich der Kunst und macht den Prozess vorhersehbar und wiederholbar. Auch relativ unerfahrene Mitarbeiter können Mehrpol-Filter mit großem Erfolg mit einem Minimum an Training optimieren. Die grundlegende Technik wurde in Agilents Application Note 1287-8 umfassend beschrieben, die auch erläutert, wie gekoppelte-Resonator Bandpässe leicht und zielführend abgestimmt werden können. Zum Erreichen der exakten Filterantwort im Durchlass- und Reflexionsbereich, kann die Mittenfrequenz jedes einzelnen Resonators genau abgestimmt, und die Kopplung zwischen den Resonatoren genau festgelegt werden. Die Methode basiert auf den Zeitbereichsantwort der Rückflussdämpfung eines Filter, wobei die Zeitbereichsantwort durch eine spezielle Art von diskreter Inverser Fourier-Transformation gewonnen wird.

Der Leser wird aufgefordert, die Informationen in der Application Note 1287-8 über die grundlegenden Techniken nachzulesen und wie sie angewendet werden, um gekoppelte-Hohlraum-Resonatorfilter abzustimmen. Diese Application Note erläutert die Technik der Zeitbereichsabstimmung und erweitert diese auf den Einsatz in Filtern mit Kreuz-gekoppelten Resonatoren, die Dämpfungspole nahe des Durchlassbereichs erlauben sowie auf Duplexfilter, die ein gemeinsames Tor (Antenne), einen oberen Durchlassbereich (Sender) und einen unteren Durchlassbereich (Empfänger) besitzen. Zusammen mit der Application Note 1287-8 bietet diese Application Note eine umfassende Zusammenstellung der Zeitbereichsabstimmung von Filtern, einschließlich Theorie, Anwendung, Aufbau und Abstimmungsverfahren.

### Das Verfahren

Ein fünfpoliges Filter aus gekoppelten Resonatoren mit vier Kopplungsstrukturen wird zur Veranschaulichung der Grundtechnik des Abstimmens verwendet. Eine schematische Darstellung des Filters ist in Abbildung 1 zu sehen, wobei die verteilten Verluste des Filters als Parallel-Widerstände der Resonator-Ersatzschaltbilder dargestellt werden. Um die hier vorgestellte Abstimmemethode anzuwenden, wird der Sweep-

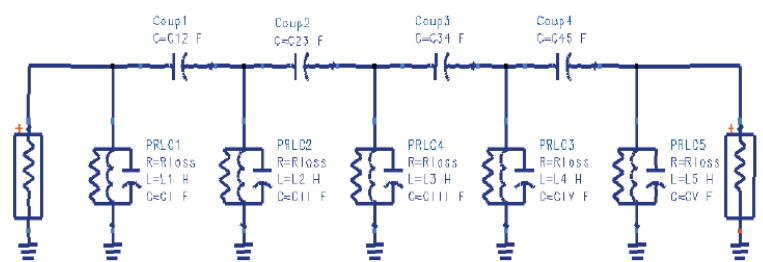


Abbildung 1

Bereich des Netzwerkanalysators auf die gewünschte Mittenfrequenz des Bandpaß Filters zentriert. Der Sweep-Bereich sollte das Zwei- bis Fünffache des erwarteten Filter-Durchlassbereiches betragen. Die Zeitbereichstransformation wird nun auf die Rückflussdämpfung des Filters angewendet. Abbildung 2 zeigt den Frequenzgang und das Zeitverhalten des Filters, ein Chebyshevfilter fünfter Ordnung mit 0,25 dB Welligkeit im Durchlassbereich.

Jeder Plot zeigt zwei Kurven. Die rote ist die Rückflussdämpfung des Filters mit Idealwerten für alle Komponenten und die blaue zeigt den Effekt der Verstimmung eines der Resonator-Elemente (in diesem Fall des zweiten Resonators). Der obere Plot zeigt den Frequenzgang und der untere Plot das Zeitverhalten. Beachten Sie die markanten Einbrüche von S11 im Zeitbereich des Filters (gekennzeichnet durch die Dreiecke mit der Bezeichnung 1-5). Dies sind charakteristische Nullen, die auftreten, wenn die Resonatoren genau abgestimmt sind. Wenn die Mittenfrequenz der Messung nur leicht geändert wird, beginnen die Nullen zu verschwinden, was darauf hinweist, dass das Filter nicht mehr abgestimmt ist. Die Maxima zwischen den Null-Werten beziehen sich auf die Koppelfaktoren des Filters. Diese Art von Reaktion gilt auch für allpolige Filter, unabhängig vom Filtertyp. Die Essenz der Abstimmtechnik ist, dass die Dips im Zeitbereich genau einem Resonator im Filter zuzuordnen sind. Wenn der Resonator richtig eingestellt ist, ist der Dip tief. Wenn der Resonator nicht abgestimmt ist, beginnt die Null verschwinden. Obwohl es bemerkenswert erscheint, dass diese Beziehung besteht, haben umfangreiche Tests mit vielen verschiedenen Arten von Filtern, sowie Simulationen und direkte mathematische Ableitung dieser Beziehung bestätigt. Abbildung 2 zeigt das Zeitverhalten bei dem nur der zweite Resonator von seinem idealen (abgeleiteten) Wert verstimmt wurde. In diesem Fall wurde der Kondensator CII auf ein paar Prozent über dem idealen Wert geändert. Man erkennt, dass der Dip fast verschwunden ist. Der Dip wird wieder „maximiert“, wenn der Kondensator seinen idealen Wert bekommt. Beachten Sie, dass eine Resonatorverstimmung die Antwort der anderen vom Meßtor abgewandten Resonatoren beeinflussen kann.

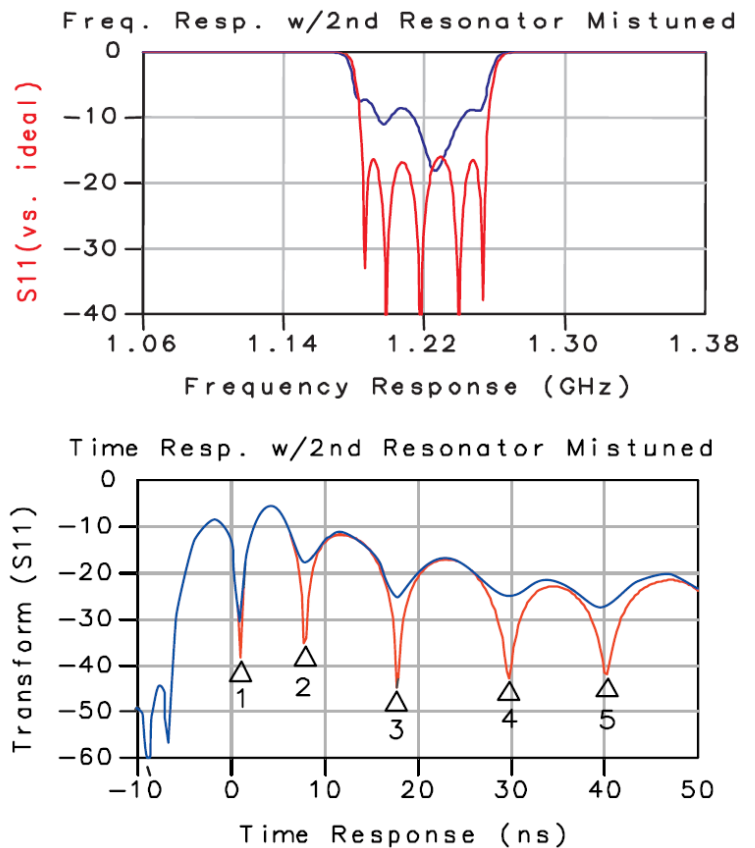


Abbildung 2

## Grundlegende Abstimmmethode

Die grundlegende Zeitbereich-Abstimmmethode für einfache allpolige Filter besteht darin, das Zeitverhalten von S11 und S22 des Filters zu messen. Die Filter-Resonatoren werden mit den folgenden Schritten eingestellt:

1. Beginnend mit dem ersten (S11) und dem letzten (S22) Resonator, werden diese so abgestimmt, dass jeweils eine tiefe „Null“ erscheint (die Null-Werte dieser Resonatoren liegen bei ca.  $t = 0$ ).
2. Dann werden die nächsten zwei Resonatoren auf tiefe Null-Werte abgestimmt (die erscheinen bei ca.  $t = 1/BW$  wo BW die Filter-Bandbreite ist). Das Abstimmen des zweiten Resonators wird den ersten leicht verstimmen, da sie gekoppelt sind.
3. Die vorherigen Resonatoren (in diesem Fall der erste und der letzte) sind neu zu justieren, um die Nullen so tief wie möglich wiederherzustellen.
4. Auf diese Weise arbeiten man sich zur Mitte hin, bis alle Resonatoren optimal eingestellt sind.

Diese erste Einstellung zentriert das Filter auf die gewünschte Mittenfrequenz und bietet eine optimale Abstimmung für die gegebenen Koppelfaktoren. Viele Filter haben verstellbare Koppelfaktoren, die abgestimmt werden müssen, um die gewünschte Filterbandbreite und Rückflussdämpfung zu erreichen. Die Einstellung der Kopplung kann mit den folgenden Schritten erfolgen:

1. Erstellen sie eine Filtervorlage durch die Messung eines vorhandenen Filters oder aus einer Filter-Simulation, und laden Sie sie in den Netzwerk-Analyser für S11 und S22.
2. Ähnlich wie im vorhergehenden Resonator-Abstimmprozess beschrieben, passen Sie nun die Eingangs- und Ausgangskopplung so an, dass die Amplitude des ersten Peaks mit dem Ziel-S11 bzw. Ziel-S22 übereinstimmt. Dabei wird es wieder notwendig sein, den ersten und letzten Resonator nach zu justieren, um die Resonanz-Nullen so tief wie möglich zu machen.

3. Verändern sie die nächsten Kopplungen des Ein- und Ausgangs so, dass die nächsten Maxima mit der Vorlage übereinstimmen. Justieren sie die angrenzenden Resonatoren wieder nach, um die zugehörigen Nullstellen so ausgeprägt wie möglich zu machen.
4. Passen sie auf diese Weise alle Kopplungen an, so dass die Maxima-Vorgaben erfüllt und die Nullstellen so tief wie möglich sind.

Beachten Sie, dass die Einstellung einer Kopplung alle folgenden Kopplungen beeinflusst. Es ist also wichtig mit den Ein- und Auskopplungen zu beginnen und sich dann zum Zentrum des Filters vorzuarbeiten. Ist eine gleichzeitige Anzeige von S11 und S22 nicht möglich, sollte das Filter immer wieder umgedreht, d.h. Ein- und Ausgang vertauscht werden.

## Abstimmung von Filtern mit kreuzgekoppelten Resonatoren

Für viele Kommunikations-Anwendungen ist es notwendig, steilere Filterflanken zu erreichen, als man normalerweise durch allpolige Art Filter erhält. Diskrete Nullstellen im Sperrbereich des Filters (wo S21 gegen Null geht) erhalten Sie durch eine Kreuz-Kopplung von Resonatoren (Kopplung zwischen anderen Resonatoren als den nächsten Nachbarn).

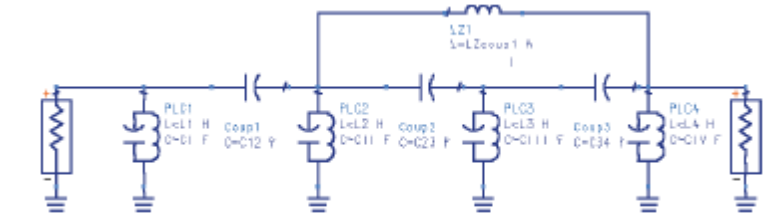


Abbildung 3

welche die Kopplung "überspringt", bestimmt die Eigenschaften der Transmissions-Nullstellen. Das Überspringen einer ungeraden Anzahl von Resonatoren führt, wie in Abbildung 3 zu sehen, zu einem asymmetrischen Frequenzgang, mit einer Nullstelle auf nur einer Seite des Durchlassbereiches. Werden zwei Resonatoren übersprungen, so ergeben sich Nullstellen auf beiden Seiten des Durchlassbereiches. Das Zeitbereichsverhalten dieser Filter unterscheidet sich von den allpoligen Filtern dadurch, dass ein Abstimmen der Resonanz-Nullstellen im Zeitbereich auf maximal niedrige Werte nicht zum gewünschten Frequenzverhalten führt.

Abbildung 4 zeigt das Frequenz- und Zeitbereichsverhalten des vierpoligen Filters mit asymmetrischer Kreuzkopplung aus Abbildung 3. In diesem Fall hatte das Filter Abgleichmöglichkeiten nur für Eingangs-, Ausgangs- und Kreuzkopplung. Die Kopplung zwischen Resonatoren war fest eingestellt. Das Filter wurde für Rückflussdämpfung im Durchlassbereich und Sperrdämpfung im oberen Sperrbereich optimiert. Man beachte, dass die Nullstellen im Zeitbereich für einige der Resonatoren nicht maximal tief liegen. Die Entwurfsmethoden für einfache, allpolige Filter helfen veranschaulichen, warum dem so ist und wie man diese Filter abgleicht.

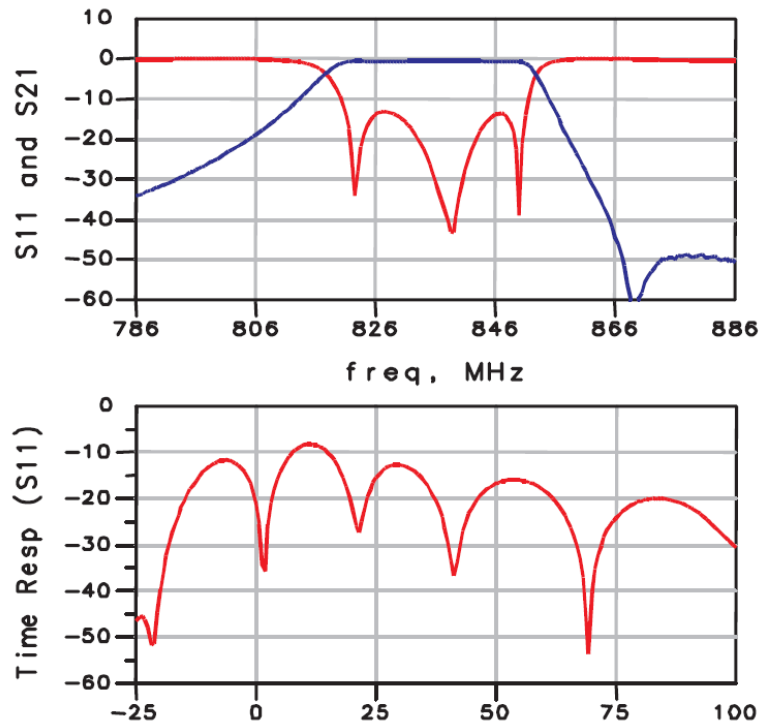


Abbildung 4

## Allpol-filter

Allpolfilter werden entworfen, indem man mit einem Tiefpass-Prototypfilter beginnt und dann eine Frequenztransformation anwendet, um ihre Frequenz auf die gewünschte Mittenfrequenz zu verschieben. Der Kern des Entwurfsprozesses besteht darin, dass die Kopplungswerte nur von den Prototyp-Komponentenwerten des Tiefpasses abgeleitet werden.

Die Resonatorwerte werden bestimmt, indem die Resonanzfrequenz des Knotens (der die Eingangs- und Ausgangskopplung enthält) gleich der Mittenfrequenz des Filters gemacht wird. Zum

Beispiel ist in dem Filter in Abbildung 1 die

Resonanzfrequenz des zweiten Knotens durch die Elemente L2 parallel zu CII plus C12 und C23 (die Kopplungselemente) definiert, und sie ist genau gleich der Filtermittenfrequenz. Dies gilt für alle Knoten, einschließlich des ersten und des letzten, denen nur ein Koppellement hinzugefügt wurde. Die Zeitbereichsantwort eines Filterknotens hat eine tiefe Null, wenn der Frequenzdurchlauf des Netzwerkanalysators exakt auf die Resonanzfrequenz für diesen Knoten zentriert ist. Ferner zeigt die Zeitbereichsantwort die Antwort der Filterknoten zeitlich getrennt an. Diese Trennung wird durch die Verzögerung durch jeden Filterabschnitt verursacht, die Fano als umgekehrt proportional zur Filterbandbreite zeigte. Die Zeitbereichsantwort hat eine ausreichende Auflösung, wenn der Frequenzdurchlauf mindestens zweimal so breit wie die Filterbandbreite ist.

Um diesen Punkt zu veranschaulichen, betrachte man die Antwort eines Filters auf einen Impuls, wie in Abbildung 5 gezeigt. Wenn der Impuls durch jeden Knoten des Filters fortschreitet, wird ein Teil reflektiert und das meiste wird übertragen. Da das Filter beim Eintreffen des Impulses noch nicht eingeschwungen ist, die nachfolgenden Resonatoren also energielos sind, sieht die Reflexion vom ersten Knoten so aus, als ob die Kopplungskapazität C12 auf der anderen Seite geerdet ist. Das heißt, die Zeitbereichsreflexion ist die gleiche wie eine Schaltung, die auf die "Knotenfrequenz" abgestimmt ist, die aus C12 + C1 parallel zu L1 besteht. Da der Impuls nach der Zeit Null auf null geht, wird die Reflexion vom Knoten 2 so aussehen, als ob sowohl C12 als auch C23 geerdet wären. Die Verzögerung zwischen diesen Impulsen ist auf die Kopplung zurückzuführen, so dass weniger Kopplung (was zu einem schmalen Filter führt) eine größere Verzögerung haben wird. Dies ist die gleiche Beziehung, die zum Entwurf des Allpolfilters verwendet wurde. Es wird dann klar, warum das Abstimmen für tiefe Nullen mit dem auf die Filtermittenfrequenz abgestimmten Netzwerkanalysator erfolgreich ist: Die Antwort von jedem einzelnen Knoten ist auf die gleiche Frequenz zentriert.

### Auswirkungen der Kreuzkopplung

Wenn die Kreuzkopplung zum Filter hinzugefügt wird, hat die Zeitbereichsantwort nicht mehr die einfache Beziehung zur Filterabstimmung. Ferner ist insbesondere in Filtern mit asymmetrischen Übertragungsnullen das Abstimmen des Filters nicht optimal, wenn jede Knotenfrequenz auf die Filtermittenfrequenz abgestimmt ist. Es sei daran erinnert, dass die Knotenfrequenz als die Resonanzfrequenz des Knotens definiert ist, wobei alle verbundenen Kopplungen, einschließlich der Kreuzkopplung, geerdet sind. Die Resonatoren werden häufig "gezogen", um den Effekt auf das Durchlassband der Übertragungsnullstellen im Sperrbereich zu kompensieren, wodurch die gewünschte Spezifikation des Durchlassbereichs-Rückflussdämpfungswerts erreicht wird. Dies führt zu einer asymmetrischen Form der Rückflussdämpfung, wie in Abbildung 4 gezeigt ist. Das Abstimmen auf tiefe Nullen führt zu einem Filter, das die Rückflussdämpfungsspezifikationen nicht erfüllt. Eine Diskussion unter Berücksichtigung von Abbildung 5 weist jedoch auf eine Methode hin, die es ermöglicht, Filter mit Kreuzkopplung mit der Zeitbereichsanalyse abzustimmen.

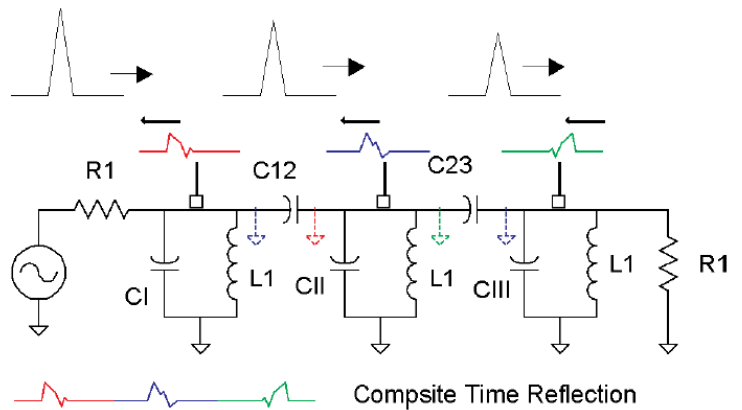
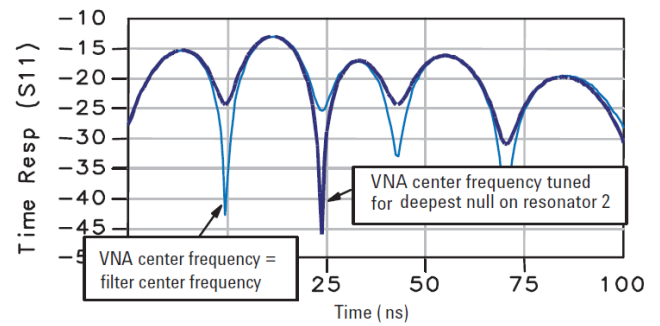


Abbildung 5. Die Zeitbereichsantwort separiert die einzelnen Knotenantworten.

Es gilt immer noch, dass die Zeitantwort eines bestimmten Knotens eines Filters eine tiefe Null aufweist, wenn die Knotenfrequenz genau auf die Mittenfrequenz des Netzwerkanalysators zentriert ist. Die Schwierigkeit bei diesen komplexen Filtern ist, dass die Knotenfrequenzen nicht mehr einfach zu bestimmen sind. Der Netzwerkanalysator selbst kann jedoch an einem richtig eingestellten oder "goldenen" Filter oder an einem simulierten Filter verwendet werden, um die einzelnen Knotenfrequenzen zu ermitteln. Dazu wird der VNA (Vector Network Analyzer) im Zweikanalmodus gefahren, wobei ein Kanal den Frequenzbereich und der andere den Zeitbereich darstellt. Die Mittenfrequenz des VNA wird nun eingestellt, während die mit einem bestimmten Resonator verbundene Nullstelle betrachtet wird. Wenn die Nullstelle maximal dargestellt wird, stimmt diese Frequenz mit der Knotenfrequenz für diesen Resonator überein. Abbildung 6 zeigt die Zeitantwort des auf die Filtermittenfrequenz abgestimmten Filters und in der zweiten Kurve abgestimmt auf eine Frequenz, welche die dem Resonator 2 zugeordnete Nullstelle maximiert ist (einer der Resonatoren mit Kreuz-Kopplung).



**Abbildung 6.** Change in time response when the VNA center frequency is tuned.

Dieser Vorgang wird für jeden der Resonatoren des Filters wiederholt, wobei die VNA-Mittenfrequenz eingestellt wird, bis jede Nullstelle maximiert ist. Für beste Empfindlichkeit wird die Frequenzspanne auf das Zweifache der Bandbreite reduziert. Tabelle 1 gibt die Knotenfrequenzen an, die für jeden Resonator für das

**Table 1. Node frequency for each resonator**

Resonator no.	Node frequency
1	836.25 MHz
2	833.85 MHz
3	834.55 MHz
4	836.45 MHz

Filter aus Abbildung 4 bestimmt wurden. Mit diesen Informationen versehen und unter Verwendung der Messung aus Abbildung 4 als Abstimmungsabblende kann ein Filterabstimmungsprozess für komplexe Filter definiert werden.

## Abstimmung komplexer Filter

Das Filter aus Abbildung 4, mit allen vier Resonatoren, der Eingangs- und Ausgangskopplung und der verstimmtten Kreuzkopplung, wird nun verwendet, um diesen Prozess zu demonstrieren.

1. Angenommen, die Eingangs- und Ausgangskopplung reicht aus, um eine ungefähre Filterform zu erzeugen. Beginnen Sie damit, das Filter so einzustellen, als wäre es ein Allpolfilter. Abbildung 7 zeigt die Frequenzantwort vor jeder Abstimmung und nachdem die Resonatoren (nicht aber die Kopplung) auf maximale Nullstellen eingestellt wurden.
2. Stellen Sie die Kopplung so ein, dass die Maxima in der Zeitbereiche mit denen des Zielfilters übereinstimmen. Denken Sie daran, die Resonatoren neu einzustellen, um tiefe Nullstellen zu erhalten. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Kopplungseinstellung.
3. Stellen Sie die Kreuzkopplung ein, um die Sperrfrequenz so einzustellen, dass sie dem Frequenzgangziel S21 entspricht (siehe Abbildung 9).
4. Um die Resonatoren auf ihre korrekten endgültigen Werte einzustellen, stellen Sie die VNA-Mittenfrequenz auf die in Tabelle 1 für jeden Resonator aufgelistete ein und stimmen Sie diesen Resonator auf maximale Nullstelle ab. Nach einem ersten Durchgang gehen Sie zurück und stimmen Sie jeden Resonator neu ab, um die Verstimmung auf die anderen Resonatoren zu berücksichtigen. Abbildung 10 zeigt das Endergebnis der Abstimmung dieses Filters. Es ist klar, dass die endgültige Antwort fast identisch ist. Denken Sie daran, dass die Abstimmung der Rückflussdämpfung vollständig in der Zeitdomäne vorgenommen wurde.

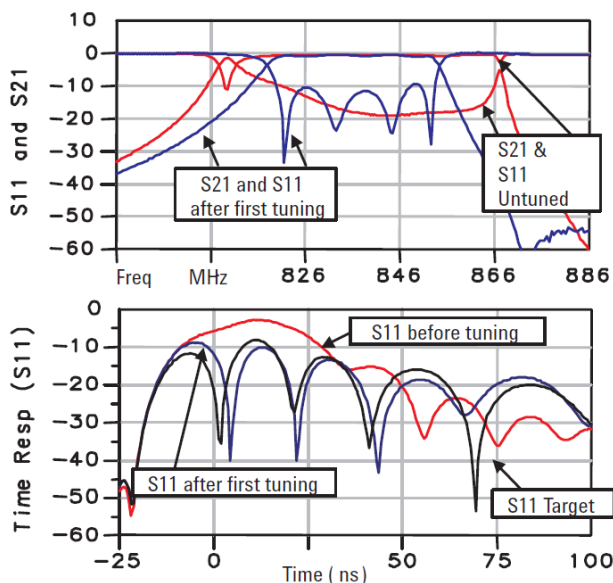


Abbildung 7

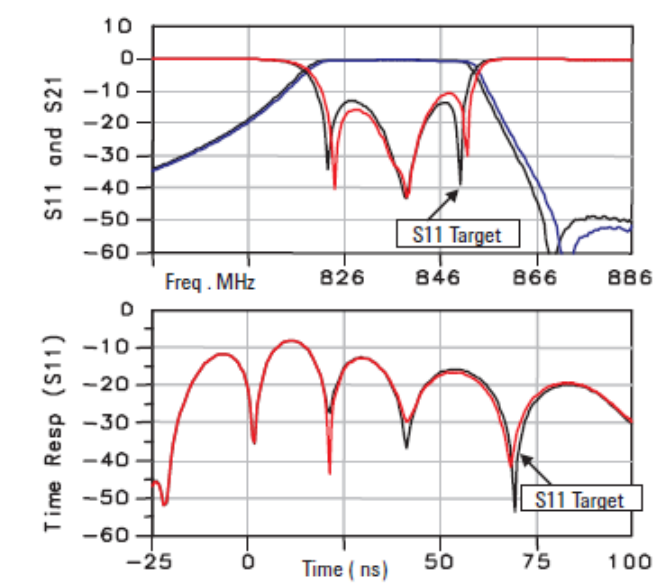


Abbildung 8

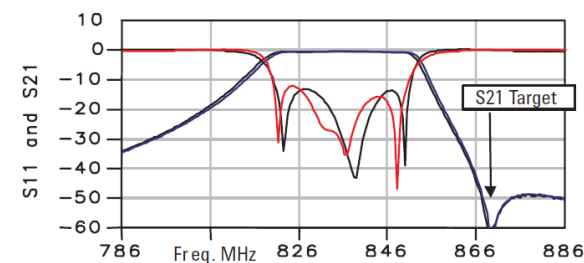


Abbildung 9

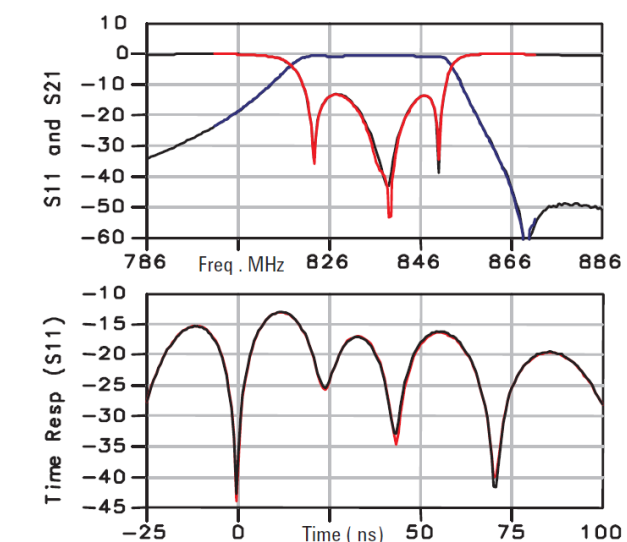


Abbildung 10

## Abstimmung von Duplexfiltern

Duplexfilter (manchmal als Duplexer bezeichnet) weisen, vom Antennenanschluss aus gesehen, zwei Pfade auf, die zur Rückflussdämpfung beitragen, wobei jede ihre eigenen Verzögerungen und Antworten hat. Die Aufgabe für den Filtertuner und der Fokus dieses Abschnitts besteht darin, diese Antworten so zu trennen, dass jede Seite des Filters deterministisch abgestimmt werden kann. Duplexfilter werden hauptsächlich verwendet, um den Übertragungskanal (Tx) von dem Empfangskanal (Rx) in einer drahtlosen Kommunikationsbasisstation zu trennen. Da Tx und Rx nahezu benachbart sind, neigen die Filter dazu, sehr asymmetrisch zu sein, um scharfe Übergänge für jedes Band zu erzeugen. Abbildung 11 zeigt das Schema eines solchen Duplexers. Man beachte, dass eine einzige Kreuzkopplung auf jeder Seite verwendet wird, aber dass die Kreuzkopplung auf der einen Seite kapazitiv und auf der anderen Seite induktiv ist. Dies ergibt eine niedrigere Übertragungsnullstelle für das Rx-Band (Rx ist in diesem Fall oberer) und eine obere Übertragungsnullstelle in dem Tx-Band, wie in Abbildung 12 gezeigt. Duplexer, die mehr als eine Bandbreitentrennung zwischen den Tx- und Rx-Bändern haben, können leichter mit dem oben genannten Verfahren zur Abstimmung von Filtern mit Kreuzkopplung abgestimmt werden. Dies liegt daran, dass der Netzwerkanalysator auf dem Tx-Band zentriert werden kann, wobei die Spanne größer als zwei Bandbreiten ist und das Rx-Band immer noch nicht mit der Eingangs- oder Ausgangsreflexionsantwort interferieren kann. Die meisten Duplexer haben jedoch wesentlich weniger als eine Bandbreite zwischen den Kanten der Tx- und Rx-Bänder (ein typischer Filter könnte eine 80 MHz-Bandbreite mit 20 MHz Trennung haben). Diese Arten von Duplexer machen das Abstimmen im Zeitbereich schwierig, da Resonatorantworten an dem gemeinsamen Port entweder von der Tx-Seite oder der Rx-Seite kommen können. In Abbildung 11 verwendet der Duplexer Viertelwellen-Transformatoren, um jede Seite des Duplexers zu isolieren (die Eingangsimpedanz der Tx-Seite ist ein Kurzschluss bei der Rx-Frequenz). Andere Topologien koppeln den gemeinsamen Port mit einem breiteren gemeinsamen Resonator, der wiederum auf der Tx- und der Rx-Seite mit dem ersten Resonator gekoppelt ist. Mit dieser Konfiguration kann der gemeinsame Resonator eindeutig weder auf die Tx- oder Rx-Durchlassbänder zentriert werden, stattdessen ist es irgendwo dazwischen zentriert.

## Zeitbereichsantwort von Duplexern

Die Zeitbereichsantwort von Duplexern wird durch die Tatsache kompliziert, dass Reflexionen sowohl von der Tx-Seite als auch der Rx-Seite an dem gemeinsamen Port einige Nullstellen in der Zeitdomäne verursachen. Abbildung 13 zeigt den Zeitbereich und die Frequenzantwort eines realen Duplexers. Um die Zeitbereichsantwort auf eine sinnvolle Weise zu betrachten, ist es erforderlich, die Mittenfrequenz des Netzwerkanalysators auf die Frequenz zwischen den Rx- und Tx-Durchlassbereichen einzustellen. Die Spanne des Analysators muss mindestens auf das

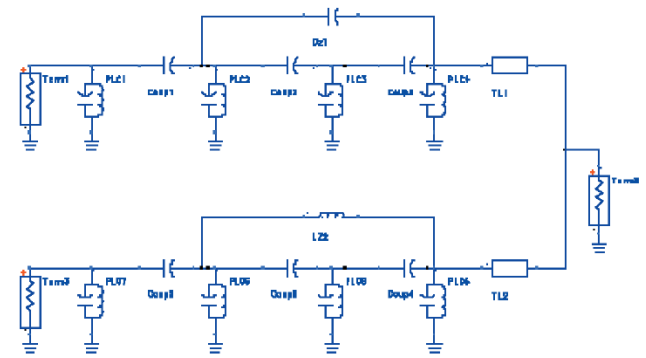


Abbildung 11

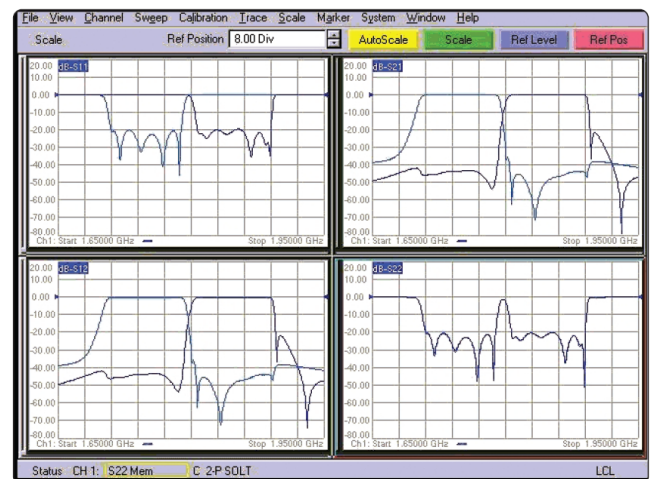


Abbildung 12

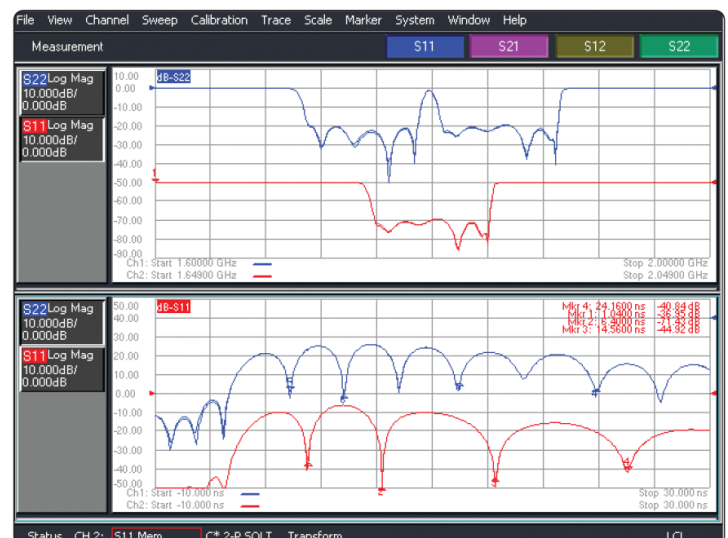


Abbildung 13. Obere Bildhälfte: Obere Kurve = Antennenanschluss  
Untere Kurve = Rx  
Untere Bildhälfte: Obere Kurve = Antennenanschluss  
Untere Kurve = Rx

Doppelte der Gesamtbandbreite der Tx- und Rx-Bänder eingestellt werden. Das folgende Beispiel des Abstimmens eines realen Duplexfilters verwendet einen Duplexer, bei dem der gemeinsame Port mit einem gemeinsamen Resonator gekoppelt ist, der wiederum sowohl mit dem letzten (5.) Tx-Resonator als auch mit dem letzten (6.) Rx-Resonator gekoppelt ist. Die Vorbereitung des Abstimmungsprozesses wie bei dem komplexen Filter von Abbildung 4 erfordert die Kenntnis eines exakten Prototyps, um die genauen Knotenfrequenzen und Zielkopplungen zu bestimmen. Es ist jedoch schwierig, die Knoten mit einzelnen Resonatoren zu assoziieren, insbesondere vom gemeinsamen Port.

### Den Resonator identifizieren

Die obere Hälfte von Abbildung 13 zeigt, dass es mehr Nullstellen in der Zeitbereichsantwort der Reflexion von dem gemeinsamen Anschluss gibt als vom Tx-Anschluss. Die erste Nullstelle ist dem gemeinsamen Resonator zugeordnet (Abbildung 14). Die zweite Nullstellenbeziehung wird gefunden, indem die Abstimmung auf dem letzten Tx-Resonator geringfügig geändert wird, und auf dieselbe Weise kann der letzte Rx-Resonator mit der dritten Nullstelle des gemeinsamen Ports assoziiert werden (Abbildung 15). Abhängig vom Filter ist es auch möglich, andere Resonatoren in dem Tx- oder Rx-Filter zu identifizieren, aber bald werden die Nullstellen verwirrend, wenn die Abstimmung eines Resonators zwei Nullen beeinflusst.

### Knotenfrequenzen finden

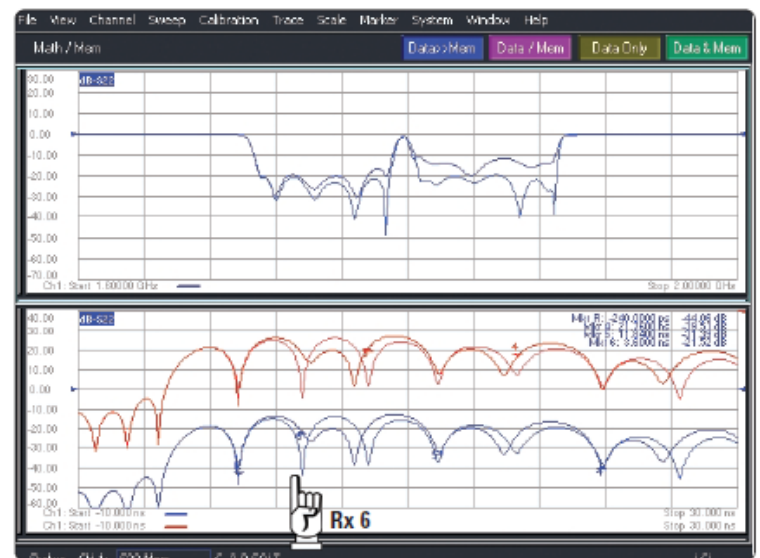
Sobald die Zuordnung von Nullen zu Resonatoren vom gemeinsamen Port für die letzten Tx- und Rx-Resonatoren erfolgt ist, wird die individuelle Knotenfrequenz für jeden Resonator durch Abstimmen der Mittenfrequenz des Analysators gefunden, bis die zugehörige Nullstelle am tiefsten ist. Diese Frequenz wird auch für jede Nullstelle aufgezeichnet, während die Reflexion von den Tx- und Rx-Ports und für die ersten mehreren Nullen von dem gemeinsamen Port gemessen wird. Diese Frequenzen (in MHz) sind in Tabelle 2 gezeigt.

### Trennen von Tx- und Rx-Antworten

Diese Knotenfrequenzen werden für die endgültige Abstimmung des Duplexers verwendet, aber experimentelle Untersuchungen zeigen, dass es nicht praktisch ist, den Duplexer direkt auf diese Frequenzen abzustimmen. Dies liegt daran, dass es so viele Wechselwirkungen von der Rx-Seite auf die Tx-Antwort gibt, insbesondere an dem gemeinsamen Port, dass die Resonatoren nicht ausreichend isoliert werden können, wenn sie nicht bereits sehr nahe an ihren korrekten Werten liegen. Die Lösung für die anfängliche Abstimmung besteht darin, eine Seite zu verzerren (sagen wir die Tx-Seite) und dann den Filter für die Rx-



**Abbildung 14.** Beim Abstimmen des gemeinsamen ANT Resonators zeigt sich eine Änderung der Kurve hauptsächlich bei der ersten Nullstelle. Dadurch kann der ANT Resonator bestimmt werden und die Frequenz dieses Resonators kann bestimmt werden, indem man die Mittenfrequenz des VNAs so verändert, bis diese Nullstelle minimal wird.



**Abbildung 15.** Die Abstimmung des 6. Rx-Resonators zeigt den größten Effekt bei der 2. Nullstelle. Durch Veränderung der Mittenfrequenz des VNAs kann mit Minimierung dieser Nullstelle die Resonanzfrequenz bestimmt werden. Achtung: die nächste Nullstelle wird auch beeinflusst.

**Table 2. Node frequency for tuned duplexer**

Common port		Tx port		Rx port	
Node	Freq.	Node	Freq.	Node	Freq.
Com	1800	TX1	1747	RX1	1848
RX6	1800	TX2	1749	RX2	1848
TX5	1796	TX3	1750	RX3	1851
RX5	1805	TX4	1760	RX4	1841
TX4	1788				
RX4	1810				

Seitenknotenfrequenzen neu zu charakterisieren. Abbildung 16 zeigt die Antwort des Duplexers mit Tx5 (derjenige, der am nächsten zu dem Resonator des gemeinsamen Ports liegt), der verstimmt ist.

In Abbildung 16 ist die VNA-Mittenfrequenz so geändert, dass die mit dem Rx 6 - Resonator assoziierte Nullstelle, die am gemeinsamen Anschluss gemessen wird, tief ist (Zeitbereich, obere Kurve). Diese Frequenz ist in Tabelle 3 als Rx 6-Frequenz aufgezeichnet. Wenn jedoch dasselbe Filter am Rx-Port gemessen wird, ist bei einer Analysator-Mittenfrequenz von 1850 MHz (Zeitbereich, untere Kurve) jeder Rx-Knoten nahezu Null.

Nachdem die Rx-Frequenzen bestimmt sind, wird der Rx 6 - Resonator hoch eingestellt und die Tx-Resonatorfrequenzen werden auf ähnliche Weise bestimmt. Die genaue Knotenfrequenz für jeden Knoten wurde in Tabelle 3 aufgezeichnet. Man beachte, dass von den Tx- und Rx-Anschlüssen die Knotenfrequenzen nahezu unverändert sind, was anzeigt, dass diese selbst in einem abgestimmten Duplexer von ihren jeweiligen anderen Seiten isoliert sind.

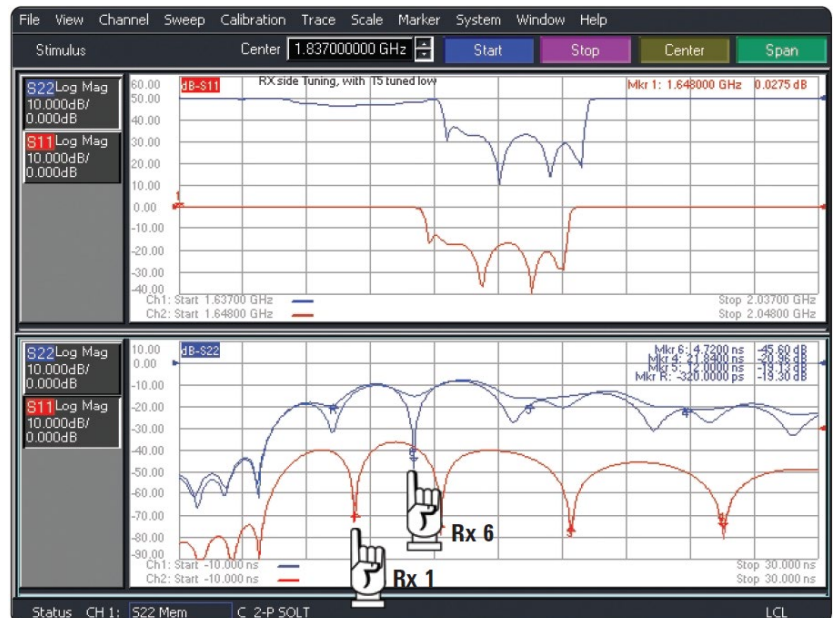
### Abstimmen eines Duplexfilters

Die Abstimmung eines Duplexers läuft wie folgt ab:

1. Beginnen Sie mit dem hochfrequenten Resonator RX6. Stimmen Sie die Tx-Seite des Filters und den gemeinsamen Port gemäß der Sternchen (\*) - Frequenzen in Tabelle 3 ab. Die Kopplung und Kreuzkopplung wird wie in Application Note 1287-8 beschrieben eingestellt.

2. Resonator TX5 so niedrig wie möglich einstellen. Stimmen Sie die Rx-Seite des Filters auf die doppelt markierten (\*\*) Frequenzen in Tabelle 3 ab. Abbildung 17 zeigt die Abstimmung, beginnend mit Rx1 und Common. Das Ergebnis der Abstimmung aller Rx-Resonatoren ist in Abbildung 18 gezeigt. Der VNA ist auf die gemeinsame Resonatorfrequenz (etwa 1800 MHz) eingestellt, so dass die Rx-Nullen nicht tief erscheinen. Hier ist der Tx 5 Resonator noch nicht abgestimmt.

3. Stimmen Sie TX5 und TX6 auf die Frequenz in Tabelle 2 ab. Abschließend stimmen Sie alle Resonatoren auf Tabelle 2 ab. Ergebnisse in Abbildung 19.

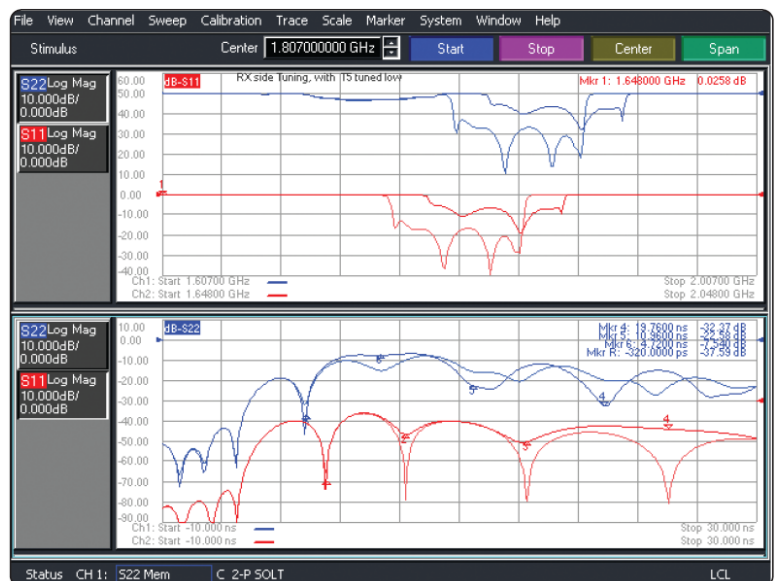


**Abbildung 16.** Die obere Kurve zeigt die Frequenzantwort der RX-Pfades, wobei die Mittenfrequenz des VNAs so eingestellt wurde, dass die zugehörige Resonatoren die tiefsten Minima aufweisen. Bei abgestimmtem Rx-Filter werden diese Frequenzen notiert, wobei der erste TX-Resonator tief abgestimmt wurde.

**Table 3. Node frequency for duplexer with sides isolated**

Common Port		Tx Port *		Rx Port **	
Node	Freq.	Node	Freq.	Node	Freq.
Com	1803**	TX1	1746	RX1	1848
	1793*				
RX6**	1829	TX2	1749	RX2	1848
TX5*	1762	TX3	1749	RX3	1850
RX5**	1848	TX4	1787	RX4	1850
TX4*	1738				
RX4**	1860				

\*Rx untuned; \*\*Tx untuned



**Abbildung 17.** Die RX-Seite des Filters ist hier abgestimmt. Die oberen Kurven zeigt das S11 und S22 dieses Filters, wobei die Mittenfrequenzen der Kurven jeweils zum ersten bzw. letzten Resonator zugeordnet sind. Die unteren Kurven zeigen die Minima jedes einzelnen Resonators.

## Komplexeres Filter-Tuning

### Umgang mit mehrfachen oder starken Kreuzkopplungen

In dem Beispielfilter, das in Abbildung 3 gezeigt ist, war der Kopplungswert für die Kreuzkopplung viel kleiner als die Hauptkopplung. Für solche Fälle hat die Kreuzkopplung keine starke Auswirkung auf die Zeitbereichsantwort. Einige Filter haben jedoch eine sehr starke Kreuzkopplung (Kopplung in der gleichen Größenordnung wie die Hauptkopplung) oder mehrere Kreuzkopplungen. In diesen Fällen kann es notwendig sein, einen anderen Ansatz zur Abstimmung der Filter zu wählen. Ein Ansatz, der effektiv war, ist das Entfernen der Kreuzkopplungen (entweder durch Einstellen eines sehr niedrigen Wertes oder durch Kurzschließen von Querverbindungen, falls sie nicht einstellbar sind). Dies führt zu einem Filter, das nicht die gewünschte Form hat, aber die richtigen Einstellungen für die Resonatoren und die Hauptkopplung hat. Dies ist ähnlich der Methode, die verwendet wird, um die Tx-Seite des Duplexers von der Rx-Seite zu isolieren. Das resultierende Filter hat nur einen Pfad in einem Allpolfilter. Eine "goldene" Filterantwort kann ohne die Kreuzkopplung erfasst werden. Wenn ein nicht abgestimmter Filter eingestellt wird, kann es so eingestellt werden, dass es dieselbe Antwort wie das "goldene" Filter hat, wenn die Kreuzkopplung entfernt wurde. Es bleibt nur, die Kreuzkopplung zurückzusetzen, um die endgültige Filterantwort zu verifizieren. Eine andere Option für Filter mit einstellbaren Kreuzkopplungen besteht darin, die Kreuzkopplung zuerst einzustellen, bevor der Rest des Filters abgestimmt wird. Dieses Verfahren kann für Filter wirksam sein, bei denen die Kreuzkopplung eine starke Wirkung auf die Durchlassbandantwort hat. Um dies zu tun, kann man die Resonatoren jenseits der Kreuzkopplung kurzschließen, was im Wesentlichen ein neues Filter darstellt, mit der Kreuzkopplung als Hauptpfad durch das Filter. Eine "goldene" Spur kann mit einem so modifizierten Filter aufgenommen werden, und der Wert der Kreuzkopplung kann in der Zeitdomäne aufgezeichnet werden. Wenn Sie ein nicht abgestimmtes Filter einstellen, wird der Vorgang umgekehrt. Die Resonatoren außerhalb der Kreuzkopplung werden kurzgeschlossen und die Kreuzkopplung wird in der Zeitdomäne eingestellt. Der Kurzschluss der Resonatoren wird entfernt und das Filter wird wie oben beschrieben abgestimmt. Dies kann bei der Kreuzkopplung effektiv sein, die zur Linearisierung der Gruppenverzögerung in Filtern verwendet wird.

Es bleibt nur, die Kreuzkopplung zurückzusetzen, um die endgültige Filterantwort zu verifizieren. Eine andere Option für Filter mit einstellbaren Kreuzkopplungen besteht darin, die Kreuzkopplung zuerst einzustellen, bevor der Rest des Filters abgestimmt wird. Dieses Verfahren kann für Filter wirksam sein, bei denen die Kreuzkopplung eine starke Wirkung auf die Durchlassbandantwort hat. Um dies zu tun, kann man die Resonatoren jenseits der Kreuzkopplung kurzschließen, was im Wesentlichen ein neues Filter darstellt, mit der Kreuzkopplung als Hauptpfad durch das Filter. Eine "goldene" Spur kann mit einem so modifizierten Filter aufgenommen werden, und der Wert der Kreuzkopplung kann in der Zeitdomäne aufgezeichnet werden. Wenn Sie ein nicht abgestimmtes Filter einstellen, wird der Vorgang umgekehrt. Die Resonatoren außerhalb der Kreuzkopplung werden kurzgeschlossen und die Kreuzkopplung wird in der Zeitdomäne eingestellt. Der Kurzschluss der Resonatoren wird entfernt und das Filter wird wie oben beschrieben abgestimmt. Dies kann bei der Kreuzkopplung effektiv sein, die zur Linearisierung der Gruppenverzögerung in Filtern verwendet wird.

### Schlussfolgerungen

In diesem Applikationsbericht haben wir Möglichkeiten aufgezeigt, die Zeitbereichsverfahren auf komplexere Filter auszudehnen. Diese Filter können komplexe Übertragungsantworten mit Kreuzkopplungen enthalten. Diese Filter können auch mehrere Pfade enthalten, z. B. in Duplexern oder sogar Multiplexern. Während gute Fortschritte bei der Erweiterung dieser Techniken gemacht wurden, gibt es viele Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Methoden und viele Filtertypen, die weitere Untersuchungen erfordern. Agilent Technologies forscht weiter auf dem Gebiet der Filterabstimmung und wird weiterhin modernste Abstimmungs-Techniken und -Anwendungen zur Unterstützung von Innovationen im Bereich der gekoppelten Resonatorfilter bereitstellen.

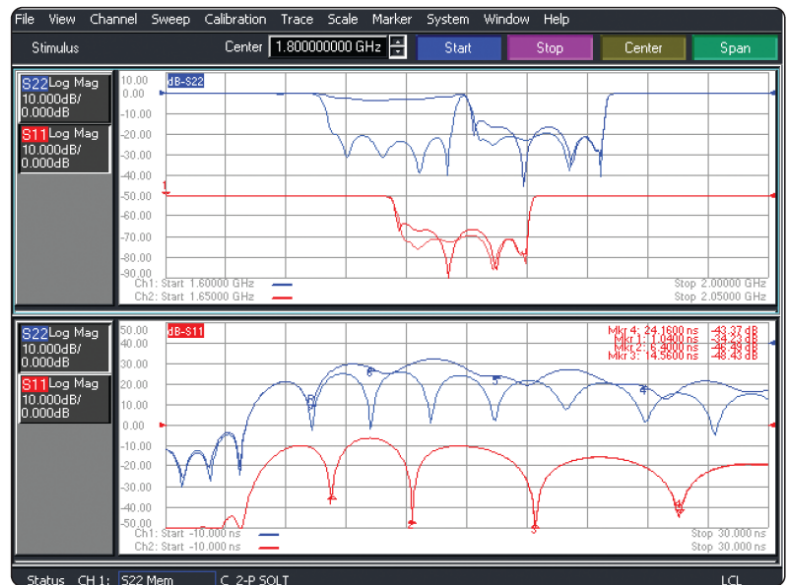


Abbildung 18

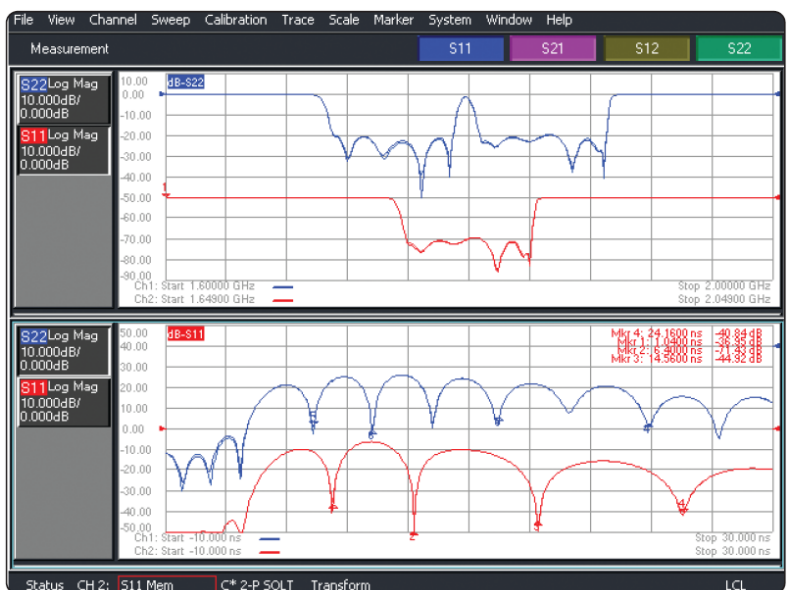


Abbildung 19