

DISS. ETH No. 15199

**FIELD SIMULATOR BASED OPTIMIZATION AND  
AUTOMATED TUNING TECHNIQUES FOR  
MICROWAVE AND MILLIMETER-WAVE FILTERS**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
PETER HARSCHER  
Dipl.-Ing., RWTH Aachen  
born December 28, 1970  
citizen of Germany

Prof. Dr. R. Vahldieck, examiner  
Prof. Dr. S. Amari, co-examiner  
Prof. Dr. J. Bornemann, co-examiner

2003

## Abstract

Microwave and millimeter-wave filters are key components in many communication systems. Often these filters must achieve remarkable performance like very low loss in the passband, high skirt selectivity, good phase linearity and high stopband attenuation. Moreover, they should be small, light-weight, low-cost, mass-producible, tuning-free or tunable. It is well known that the design and fabrication of complex filter structures at microwave and millimeter-wave frequencies is as much art as science. Major problems are that synthesis procedures often do not exist or provide only rough element values or geometrical dimensions of the physical filter implementation; EM-simulation to compute the overall response of the synthesized filter is CPU-intensive and can not be directly used in the filter optimization; and finally the fabricated filter requires time-consuming and costly tuning to compensate for fabrication tolerances.

In this work, several novel techniques for the design, field-simulator based optimization and automated tuning of microwave and millimeter-wave filters are presented.

First, a general coupling matrix synthesis technique based on symbolic manipulation and optimization is presented. The determinants of coupling matrices are solved by symbolic instead of numerical computation which allows to express the S-parameters of a filter prototype network as ratio of two polynomials with complex coefficients. To obtain accurate coupling values, the polynomial coefficients are optimized towards the ideal coefficients of generalized Chebychev filtering functions. This technique is similar to the techniques introduced in [1] and [2] which are also shortly reviewed. Examples of various filters with complex coupling and routing schemes and with symmetric and asymmetric responses are presented.

To speed up gradient-based optimization on the basis of field solvers, a novel technique for analytical gradient calculation of cost functions is introduced. The technique is illustrated and validated by optimizing various filter structures using the Finite Element Method (FEM) and Coupled-Integral-Equations Technique (CIET). This technique is not restricted to filters and can be also used for other microwave components.

Then a novel and efficient CAD technique for microwave and millimeter wave filters on the basis of field solvers and a generic surrogate model is presented. The technique can be easily adapted to complex filter structures and filters with multi-resonator couplings. The CAD procedure - parameter extraction, diagnosis, sensitivity analysis, parameter optimization - is illustrated at several examples. Important topics like convergence, local minima, uniqueness are discussed. Because of its flexibility and easy application, this technique has considerable advantages compared to conventional techniques. Time saving in the CAD process is tremendous.

Then two different techniques for automated filter tuning are presented. The first technique is based on equivalent network models which are adapted to the filter under test by a set of initial measurements. Filter tuning is accomplished by gradient optimization

of the corrected computer model rather than its physical realization. Only as a final step are the tuning screws of the physical model turned to the position determined by the optimization process. The technique is validated for a direct-coupled filter.

In the second technique, the filter to be tuned is represented by a generalized filter lowpass prototype model rather than a specialized equivalent network. The prototype model is based on the minimum number of characteristic filter parameters to represent the filter transfer function correctly. The parameter values are found from a gradient-based parameter extraction process using measured S parameters. Automated filter tuning is performed as a two-step procedure. First, the parameter sensitivities with respect to the tuning elements are determined by a series of S-parameter measurements. Second, the parameter values of the filter are compared to the values of the ideal filter prototype found from a filter synthesis, thus yielding the optimal screw positions. This novel tuning technique has been tested successfully with direct coupled 3-resonator and cross-coupled 4- and 6-resonator filters. On the basis of the prototype model it will also be shown how Q-factors of individual resonators can be extracted from measured filter responses. The system is fully automated and requires only little user interaction.

## Zusammenfassung

Mikrowellen- und Millimeterwellenfilter sind Schlüsselbestandteile vieler Kommunikationssysteme. Häufig müssen diese Filter bemerkenswerte Eigenschaften aufweisen, zum Beispiel sehr niedrigen Verlust im Passband, hohe Flankensteilheit, gute Phasenlinearität und hohe Stoppbanddämpfung. Außerdem sollten sie klein, leicht, preisgünstig, massenerzeugbar, abstimmfrei oder abstimmbare sein. In der Entwicklung und Herstellung dieser komplexen Filterstrukturen bei Mikro- und Millimeterwellenfrequenzen steckt genauso viel Kunst wie Wissenschaft. Hauptschwierigkeiten sind, dass Syntheseverfahren nicht existieren oder oft nur grobe Elementwerte oder geometrische Abmessungen der Filterstruktur liefern. Die dann erforderliche elektromagnetische Feldberechnung zur Ermittlung der Filterantwort ist rechenintensiv und kann daher nicht direkt in Verbindung mit einem Optimierungsprogramm verwendet werden. Das hergestellte Filter braucht schließlich zusätzlich noch zeitaufwendige und teure Abstimmmaßnahmen um die Herstellungstoleranzen auszugleichen.

In dieser Arbeit werden mehrere neue und innovative Techniken für das Design, die feldsimulatorbasierte Optimierung und das automatische Abstimmen von Mikro- und Millimeterwellenfiltern eingeführt.

Zuerst wird eine allgemein anwendbare Koppelmatrix-Synthesetechnik basierend auf symbolischer Manipulation und Optimierung beschrieben. Die Determinanten der Koppelmatrix werden hier nicht numerisch sondern symbolisch berechnet, was den Vorteil bietet, daß die S-Parameter des Filterprototyps als Bruch zweier Polynome mit komplexen Koeffizienten ausgedrückt werden können. Die Koeffizienten dieser Polynome werden mittels Optimierung an die idealen Koeffizienten der Tschebyscheff-Polynome angeglichen. Dies liefert genaue Werte der Koppelkoeffizienten. Diese Technik ist ähnlich den in [1] und [2] beschriebenen Techniken, die hier auch kurz zusammengefasst werden. Einige Beispiele von Filtern mit komplexen Koppelschemen und mit symmetrischer bzw. asymmetrischer Filterantwort werden gezeigt.

Um die gradientenbasierte Optimierung in Verbindung mit allgemeinen Feldberechnungsprogrammen zu beschleunigen wird eine Technik gezeigt, die es erlaubt die Gradienten von Kostenfunktionen analytisch zu berechnen. Diese Technik wird auf die Optimierung von mehreren Filterstrukturen angewandt und validiert. Dabei werden die Finite-Elemente-Methode und die CIET (Gekoppelte-Integral-Gleichungs-Technik) eingesetzt. Der Anwendungsbereich dieser Technik beschränkt sich nicht nur auf Filter. Sie kann ebenso für andere Mikrowellenkomponenten eingesetzt werden.

Als nächstes wird eine neue und leistungsfähige CAD-Technik für Mikrowellenfilter basierend auf allgemeinen Feldberechnungsprogrammen und "Surrogate Models" eingeführt. Diese Technik kann auf komplexe Filterstrukturen angepasst werden wie zum Beispiel für Filter mit mehreren Kreuzkopplungen. Dieses Verfahren, bestehend aus Parameterextraktion, Sensitivitätsanalyse, Parameteroptimierung, wird an mehreren Beispielen

len veranschaulicht. Wichtige Punkte, wie Konvergenz, lokale Minima und Eindeutigkeit der Lösungen werden besprochen. Durch ihre Flexibilität und die einfache Anwendbarkeit hat diese Methode beträchtliche Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Die Zeitersparnis im CAD-Entwicklungsprozess ist enorm.

Weiterhin werden zwei unterschiedliche Techniken zum automatischen Abstimmen von Filtern vorgestellt. Die erste Technik basiert auf äquivalenten Netzwerkmodellen die auf das zu untersuchenden Filter mittels einer Reihe von Anfangsmessungen angepasst werden. Das Abstimmen des Filters erfolgt dann durch gradientenbasierte Optimierung des Computermodells anstelle des physikalischen Filters. Erst zum Schluss werden die Schrauben des Filters an die von dem Optimierungsalgorithmus berechneten Positionen gedreht. Die Technik wird an einem direkt gekoppelten Filter validiert.

Bei der zweiten Technik wird das abzustimmende Filter durch ein verallgemeinertes Filtertieffpassmodell dargestellt. Dieses Prototyp-Modell ist aus der minimalen Anzahl charakteristischer Filterparameter aufgebaut, die notwendig sind um die Filterantwort nachzubilden. Die Parameterwerte werden mittels gradientenbasierter Optimierung aus gemessenen S-Parametern gefunden. Das automatische Abstimmen des Filters besteht dann aus zwei Schritten. Im ersten werden die Sensitivitäten des Filters bezüglich der Abstimmelemente aus einer Reihe von S-Parametermessungen bestimmt. Im zweiten Schritt werden dann die Parameterwerte des abzustimmenden Filters mit den idealen Werten aus der Filtersynthese verglichen und an diese hin optimiert. Dies liefert die idealen Positionen der Abstimmerschrauben. Diese Technik wurde an einem direktgekoppelten 3-Resonatorfilter und einem kreuzgekoppelten 4- und 6-Resonatorfilter getestet und validiert. Auf der Basis dieses Filter-Prototyp-Modells wird auch gezeigt, wie die Güten der einzelnen Resonatoren eines Filters aus gemessenen S-Parametern extrahiert werden können. Das Abstimmensystem ist vollautomatisiert und benötigt nur wenige Eingriffe des Anwenders.