



Doctoral Thesis

Traceable S-parameter measurements in coaxial transmission lines up to 70GHz

Author(s):

Hoffmann, Johannes

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005910533> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 18593

TRACEABLE S-PARAMETER MEASUREMENTS IN COAXIAL TRANSMISSION LINES UP TO 70 GHz

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
JOHANNES HOFFMANN

Diplom Ingenieur
University of Stuttgart, Germany

Ingénieur des Télécommunications
École Nationale Supérieure des Télécommunications, France

born August 31, 1978
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ch. Hafner, examiner
Prof. Dr. R. Vahldieck, co-examiner
Dr. U. Arz, co-examiner

2009

Abstract

Measuring the reflectivity and transmissivity of microwave devices has many applications in science and industry. Measurement tasks range from component testing for cell phones to characterizing carbon nano tube transistors. There are commercial solutions for most measurement tasks. Nonetheless, there will always be the question: What is the accuracy of such measurements and how can it be improved? In coaxial S-parameter measurements, the largest error contributions come from the connectors. The most precise connectors, laboratory precision connectors, have to be examined to improve measurement accuracy. A related topic is the question how reflection and transmission can be measured accurately with snap-on connectors.

Probably the most fundamental requirement to answer these questions is to understand how electromagnetic waves propagate in coaxial lines. There are many publications on this topic, but still the presented theories fail to accurately predict wave propagation in coaxial lines with plated rough surfaces for frequencies above 50 GHz. A new method to predict the phase constant and the losses in such realistic coaxial lines is presented. Using a 2D field simulator, the effects of roughness and plating are converted to artificial material parameters. These are used to define a coaxial line problem with smooth conductors, which can be solved with already known algorithms. The method presented here is far more accurate than existing techniques and can thus be used for the computation of calibration standards.

Here only standards which completely consist of metal are considered because they can be characterized most accurately. Air lines and offset shorts are such standards. Both are connected with a connector to the vector network analyzer (VNA). This connection is usually neglected for the calculation of calibration standard parameters, but it is essential for frequencies higher than 50 GHz. For this reason a 3 D field simulation of the slotted 1.85 mm connector is done. Careful validation of the simulation based on (A) comparing the results of two different numerical techniques, (B) parameter studies and (C) meshing convergence are essential for the

derived S-parameter model of the connector. With a software implementation of this model one can compute the reflection coefficient of a given connector within seconds. Cascading the model of the connector with the model of the transmission line yields the S-parameters of an air line standard. A similar combination, extended by the model of a short plane, yields the reflection coefficient of an offset short.

Such transmission and reflection standards are used for the calibration of a VNA. Thereby the VNA is described by a simplified model which contains the main paths of wave propagation in the VNA. Given the VNA model, calibration means finding the coefficients of wave propagation for each path. One often measures more standards than necessary to determine the coefficients. The inevitably occurring inconsistencies between standards, VNA model and measured raw S-parameters are usually attributed to the definition of the standards. The calibration algorithm presented here attributes the occurring errors not only to the definition of the standards but as well to the simplified model of the VNA. Temperature drift and cable movement are the most prominent among numerous reasons why the simplifying assumptions for the model of the VNA are not correct. Thus the new error model of calibration is closer to reality. As a next step, the error model is converted into an equation for calibration by the application of Bayes law. The resulting algorithm uses nonlinear optimization and Monte Carlo integration for the computation of the calibration coefficients. The realistic modeling of uncertainties results in a more stable and accurate calibration algorithm.

The calibration of a VNA with snap-on connectors requires special measures. In fact, performing a usual calibration with snap-on connectors is almost senseless because snap-on connections are much less repeatable than laboratory precision connections. It is shown that a much better approach is using a characterized adapter from precision to snap-on connector. The respective advantage in terms of accuracy is quantified by comparing various traditional calibration methods and the adapter method by Monte Carlo simulation (MCS). A crucial point is the characterization of the adapters. Two methods are investigated and compared against each other. The first is a method which uses only short, open and thru, the second is a method which uses beadless adapters. The beadless adapters are characterized by mechanical measurements and subsequent modeling. The accuracy achieved with the beadless adapter method is superior to the first method, which uses the short, open and thru standards.

Zusammenfassung

In Industrie und Wissenschaft müssen häufig Transmission und Reflexion an Mikrowellenkomponenten gemessen werden. Die Messaufgaben sind sehr vielfältig und reichen von Messungen an Mobilfunkkomponenten bis zur Charakterisierung von Carbon Nanotube Transistoren. Obwohl es für die meisten Messaufgaben kommerzielle Lösungen gibt, wird folgende Frage immer wieder gestellt: Was ist die Genauigkeit der Messungen und wie kann sie erhöht werden? Für koaxiale S-Parameter Messungen ergibt sich die Antwort meist aus einer genauen Analyse der Stecker. Durch eine Charakterisierung der Stecker kann die Messgenauigkeit meist deutlich erhöht werden, was sowohl für die genauesten verfügbaren Stecker, sogenannte Präzisionsstecker, als auch für auf Industrieanwendungen ausgelegte Schnappverschlussstecker funktioniert.

Da sich ein Stecker im Idealfall wie ein Stück Leitung verhält, ist es sinnvoll zunächst die Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen in Koaxialleitungen zu studieren. Zu diesem Thema gibt es viele Veröffentlichungen, aber mit den gängigen Theorien kann man die Fortpflanzung von Wellen in Koaxialleitungen mit rauen beschichteten Oberflächen nur sehr ungenau berechnen. Eine neue und genauere Methode, um die Phasenkonstante und die Verluste einer solchen realitätsnahen Koaxialleitung zu bestimmen, besteht darin, die Auswirkungen von Rauigkeit und Beschichtung mit einem 2D Feldsimulationsprogramm in künstliche Materialparameter zu konvertieren. Diese werden wiederum benutzt, um ein Koaxialleitungsproblem mit glatten Leitern zu definieren, welches mit schon bekannten Algorithmen gelöst werden kann. Die hier präsentierte Methode ist weitaus genauer als bestehende Techniken und kann deshalb zur Berechnung von Kalibrationsstandards eingesetzt werden.

Ganz aus Metall bestehende Standards wie Luftleitungen und Offset Shorts lassen sich am genauesten charakterisieren. Beiden Standardtypen ist gemein, daß sie mit Steckern an den Netzwerkanalysator (NWA) angeschlossen werden, welche allerdings bei der Berechnung von Kalibrationsstandards normalerweise nicht berücksichtigt werden. Um diesen Fehler in der Definition der Standards zu beheben, wurde eine 3D Feldsimu-

lation des geschlitzten 1.85 mm Steckers durchgeführt. Eine sorgfältige Überprüfung der Simulationsergebnisse anhand von Vergleichen zwischen verschiedenen numerischen Methoden, Parameterstudien und Konvergenzstudien ist sehr wichtig für die Genauigkeit der Ergebnisse. Durch Variation der Steckerdimensionen kann aus den Simulationsergebnissen eine Datenbank aufgebaut werden, die mittels Interpolation die S-Parameter eines beliebigen Steckers innerhalb weniger Sekunden bereitstellt. Dieses Modell erlaubt auf einfache Art und Weise die komplette Beschreibung eines Standards. So wird für einen Luftleitungsstandard das Modell des linken und rechten Steckers und der dazwischen liegenden Koaxialleitung kaskadiert, um die S-Parameter des ganzen Standards zu berechnen. Das Modell des Offset Shorts ist ähnlich, allerdings wird hier der zweite Stecker durch eine Kurzschlussenebene ersetzt.

Solche Transmissions- und Reflexionsstandards werden für die Kalibration eines NWA's benutzt. Das Ziel der Kalibration ist, die Koeffizienten der Wellenhauptausbreitungspfade im NWA zu bestimmen. Dazu werden häufig mehr Standards als nötig gemessen, was unweigerlich zu Inkonsistenzen zwischen Standards, NWA Modell und gemessenen rohen S-Parametern führt. Diese Inkonsistenzen werden meist durch Fehler in der Beschreibung der Standards erklärt, aber der hier beschriebene Kalibrationsalgorithmus basiert auf einem allgemeineren Fehlermodell. Durch Temperaturdrift und Kabelbewegungen verändern sich die als konstant angenommenen Koeffizienten der Ausbreitungspfade im NWA, was ein um Fehler im NWA Modell erweitertes Fehlermodell motiviert. Dieses erweiterte Fehlermodell wird mit dem Bayesschen Gesetz in eine Kalibrationsgleichung umgewandelt. Der auf dieser Gleichung basierende Algorithmus verwendet nichtlineare Optimierung und Monte Carlo Integration, um die Kalibrationskoeffizienten zu berechnen. In einem Vergleich mit anderen Kalibrationsalgorithmen hat sich gezeigt, daß der neue Algorithmus stabiler und präziser als die getesteten Algorithmen ist.

Die bisher beschriebene Strategie, bestehend aus genauer Modellierung der Standards und Minimierung des Fehlereinflusses durch statistische Modellierung, ist von begrenztem Nutzen für Messobjekte mit Schnappverschlusssteckern. Die Längenvarianz solcher Steckverbindungen ist so groß, daß eine Kalibration mit Schnappverschlussstandards nicht die geforderte Genauigkeit liefern kann. Allerdings hat eine Monte Carlo Simulation des Kalibrationsprozesses gezeigt, daß eine viel höhere Messpräzision durch eine vorhergehende Kalibration mit Präzisionssteckern

und nachfolgendem Anbringen von Adaptern erzielt werden kann. Die dabei erforderlichen Adapter müssen möglichst genau charakterisiert sein, was mit zwei hier untersuchten Methoden erreicht werden kann. Die erste Methode benötigt die Schnappverschlusstandards Short, Open und Thru zur Charakterisierung der Adapter, während die zweite Methode mit stützscheibenlosen Adaptern arbeitet. Experimente haben gezeigt, daß die Methode mit den stützscheibenlosen Adaptern genauer ist als die erste Methode.