

# HF-Bauelement richtig vermessen

## Auswahlkriterien für Testhalterungen und Messverfahren

**D**urch höheren Integrationsgrad und vielfältige Gehäuse- und Bauformen hat sich die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften durch eine Vermessung der HF-Bauelemente und Schaltungen in den letzten Jahren zunehmend als große Herausforderung für die Hersteller und Entwickler von HF-Systemen dargestellt. Die Wahl der richtigen Testhalterung bzw. Testmethode kann hier helfen, viele Probleme zu vermeiden.

Messungen hoher Qualität an HF-Bauelementen mit standardmäßigen koaxialen Steckern sind relativ einfach. Sehr genaue Messungen können unter Zuhilfenahme im Handel erhältlicher Kalibrierkits und standardmäßiger Fehlerkorrekturroutinen, wie sie die meisten Netzwerkanalysatoren bieten, durchgeführt werden. Genaue Messungen an Objekten mit nicht standardmäßigen Steckern sind ein wenig schwieriger, weil dazu Adapter und oft spezielle Kalibrierkits erforderlich sind. Objekte ohne Stecker stellen die größte Herausforderung dar, weil eine Testhalterung erforderlich ist, um eine elektrische und mechanische Verbindung zwischen dem zu testenden Objekt und die koaxialen Stecker der Messgeräten herzustellen. Des weiteren werden oft Kalibrierstandards in der Testhalterung benötigt, um das Genauigkeitsniveau zu erreichen, das viele der heutigen Messobjekte erfordern.

### Testhalterung

Im Folgenden wird kurz das Verhalten einer idealen Testhalterung untersucht. Grob gesprochen, soll sie eine transparente Verbindung zwischen einem Messgerät und einem zu testenden Objekt herstellen. Dies würde eine direkte Messung des Objekts ermöglichen, ohne dass die Eigenschaften der Testhalterung eine Rolle spielen. In parametrischen Begriffen ausgedrückt, müsste die Halterung also keine Dämpfung, einen flachen Fre-

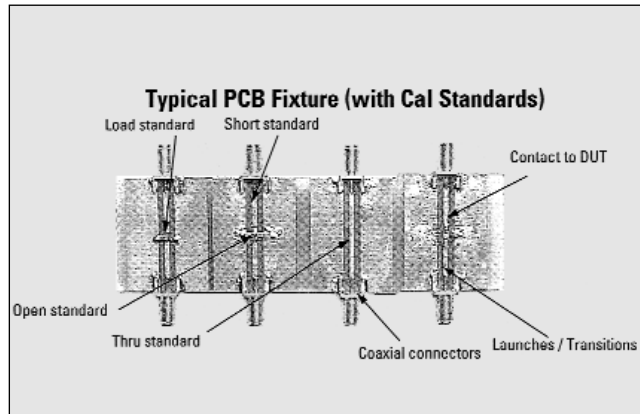


Abb. 1:  
Die Zweitor-Kalibrierung ist die genaueste Form der Fehlerkorrektur

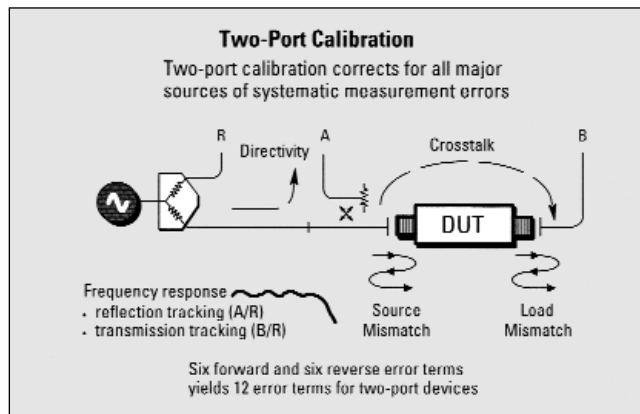


Abb. 2:  
TDR: die zusätzliche Auflösung einer 20 GHz-Wobbelung gegenüber einer 6 GHz-Wobbelung im Falle eines Last-Standards in einer Halterung

quenzgang mit linearer Phase und keine Fehlanpassungen haben sowie eine genau bekannte elektrische Länge und eine unendlich große Isolation zwischen Ein- und Ausgang aufweisen. Wenn dies erreichbar wäre, wäre die Kalibrierung einfach. Es würde keine Notwendigkeit bestehen, die Halterung selbst zu kalibrieren und die Überalles-Systemkalibrierung könnte durchgeführt werden, indem man an den Testport-Kabeln kalibrierte und dann eine mathematische Verlagerung der Kalibrierebene durchführt, um der elektrischen Länge der Halterung gerecht zu werden.

Da es im realen Leben unmöglich ist, eine ideale Halterung herzustellen, besteht nur die Hoffnung, dem Idealfall möglichst nahe zu kommen. Die kann erreicht werden, indem die Eigenschaften der Testhalterung relativ zur Eigenschaften des Messobjekts optimiert wird. Ein Ansatz ist, die Dämpfung der Halterung kleiner als die Unsicherheitsspezifikation der Verstärkung oder Dämpfung des Messobjekts auszuliegen. Die Bandbreite muss nur groß im Verhältnis zur gewünschten Messbandbreite des Messobjekts sein. Die Fehlanpassung kann

mit einer guten Dimensionierung und unter Zuhilfenahme effektiver Werkzeuge wie der Zeitbereichsreflektometrie (TDR) minimiert werden.

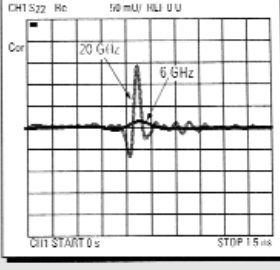
### Testhalterung für Produktion vs. Entwicklung

Halterungen für den Einsatz in der Produktion sehen deutlich anders aus als Halterungen für die Entwicklung, weil viele der grundlegenden Auslegungsziele unterschiedlich sind. In der Produktion geht es in erster Linie um Durchsatz. Die Produktion benötigt daher eine Halterung, die Einlegen, Ausrichtung und Fixierung des Messobjekts schnell ermöglicht. Sie muss robust sein, weil viele tausend Teile während der Standzeit der Halterung eingelegt werden. Für einen großen Anteil der Testobjekte sind nachgebende Kontakte erforderlich, um die Unebenheit der Kontaktoberfläche des Messobjekts auszugleichen. Aus all diesen Gründen sind Halterungen für die Produktion auch mechanisch sehr anspruchsvoll.

**Autor**  
DIETER DAHLMMEYER ist als freier Mitarbeiter für Agilent Technologies tätig;  
Gartenstrasse 8A, D-61250 Usingen  
Fon: 06081/12384, Fax: 06081/687499  
e-Mail: ddahlmeyer317@aol.com

**TDR Basics Using a Network Analyzer**

- start with broadband frequency sweep (often requires microwave VNA)
- inverse FFT to compute time-domain
- resolution inversely proportionate to frequency span



**Abb. 3:**  
Verhalten eines Durchgangsstandards in einer Halterung, die für den Einsatz in der Produktion vorgesehen ist

Von den zwei grundlegende Fehlerkorrekturtechniken, die Modellierung und die direkte Messung, existieren einfache und komplizierte Varianten. Letztere erfordert allerdings mehr Aufwand, liefert aber genauere Ergebnisse.

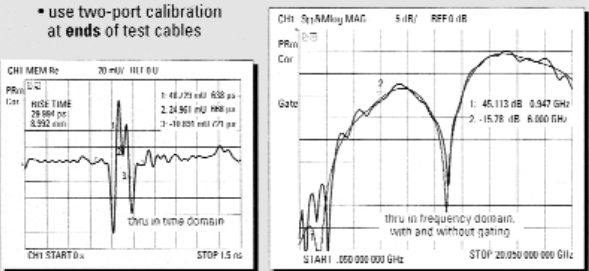
**Modellierung**

Die auf Modellierung basierende Kalibrierung benutzt mathematische Korrekturen, die aus einem genauen Modell der Halterung abgeleitet wurden. Dieses Modell kann durch exaktes Vermessen der Halterung ermittelt werden. Die direkte Messung beinhaltet normalerweise die Messung physikalischer Kalibrierstandards und die Berechnung von Fehlertermen. Diese Methode bietet eine Genauigkeit, die darauf basiert, wie genau der Anwender die Eigenschaften des Kalibrierstandards kennt. Die Anzahl von Fehlertermen, die korrigiert werden kann, variiert in Abhängigkeit von der benutzten Kalibrierung. Die Normalisierung entfernt nur einen Fehlerterm, während die Full-Two-Port-Korrektur zwölf Terme berücksichtigt.

Die Modellierung hat den Vorteil, dass keine Entwicklung von Kalibrierstandards für den Einsatz in der Halterung erforderlich ist. Die einfachste Form ist die Verlagerung der Messebene (Port Extensions), die die Messebene zum Messobjekt hin mathematisch verschiebt. Dieses Feature ist in der Firmware der meisten Netzwerkanalysatoren eingeschlossen. Port Extensions geht davon aus, dass die Halterung einer perfekten Übertragungsleitung gleicht: keine Dämpfung, mit flachem Frequenzgang, linearer Phasengang und konstante Impedanz. Die Verlagerung der Messebene wird gewöhnlich nach einer Zweitor-Kalibrierung am Ende der Testkabel vorgenommen.

**Time-Domain Gating**

- TDR and gating can remove undesired reflections only useful for broadband devices (a load or thru for example) and broadband fixture
- define gate to only include DUT
- use two-port calibration at ends of test cables



**Abb. 4:**  
Die glattere Kurve im linken Graph zeigt die Antwort des Laststandards mit Gating. Der rechte Graph zeigt, dass der Laststandard leicht induktives Verhalten aufweist

Für Applikationen in der Entwicklung können Halterungen dagegen viel einfacher und weniger robust sein. Diese Halterungen basieren oft auf Leiterplatten. Da der Messbeauftragte gewöhnlich nur einige wenige Objekte zu messen hat, können die zu messenden Teile in der Halterung ein- und ausgelötet werden.

**Kalibriermöglichkeiten**

Die relative Performance der vorgestellten Testhalterung, verglichen mit den Spezifikationen des Messobjekts, wird ausschlaggebend dafür sein, welche Tiefe der Kalibrierung erforderlich ist, um die gewünschte Messgenauigkeit zu erreichen.

**LESERTIPP**

**? Sie sind Anbieter von Produkten und Dienstleistungen für die EMV oder CE-Kennzeichnung und möchten sich in der kommenden Jahresausgabe des EMC KOMPENDIUMs präsentieren?**

**Wir informieren Sie gerne über Beteiligungsmöglichkeiten.**

**Rufen Sie an +49/89/500 383-0!**

Messen • Prüfen • Verifizieren

**publish industry**  
TECHNIK KOMMUNIZIEREN

Gollierstraße 23 · D-80339 München · Fon. +49/89/500383-0 · Fax. +49/89/500383-10 · info@publish-industry.net · www.publish-industry.net

## Deembedding

Eine rigorosere Vorgehensweise ist das ‚Deembedding‘. Es erfordert ein genaues lineares Modell oder gemessene S-Parameter-Daten der Halterung. EDA-Werkzeuge können dabei helfen, das Modell der Halterung zu analysieren und zu optimieren. In-Fixture-Kalibrierstandards können dazu benutzt werden, das Verhalten der Halterung zu messen. Eine externe Software ist erforderlich, um die bei einer Kalibrierung ohne die Halterung erhaltenen Fehlerdaten mit den modellierten Fehlern der Halterung zu kombinieren. Wenn die Fehlerterme der Halterung einzig und allein aus einem Modell abgeleitet werden, hängt die zu erreichende Überalles-Messgenauigkeit davon ab, wie gut das wirkliche Verhalten der Halterung mit dem modellierten Verhalten übereinstimmt.

Für Halterungen, die nicht auf einfachen Übertragungsleitungen basieren, ist die Bestimmung eines präzisen Modells gewöhnlich schwieriger als die Entwicklung guter ‚In-Fixture‘-Kalibrierstandards besonders im HF-Bereich.

Mit der Verlagerung der Messebenen wird die zusätzliche elektrische Länge der Halterung korrigiert, wobei Dämpfungs- und Anpassungsfehler, die in der Halterung vorhanden sein können, ignoriert werden. Die Verlagerung der Messebenen nutzt die interne ‚Electrical Delay‘-Möglichkeit von Netzwerkanalysatoren, um den linearen Anteil des Phasengangs der Halterung zu entfernen. Nachdem die Verlagerung der Messebenen angewandt wurde, kann der Phasengang des Messobjekts ermittelt werden.

## Direkte Messung

Direkte Messungen haben den Vorteil, dass die präzisen Eigenschaften der Halterung zunächst nicht bekannt sein müssen, weil sie während des Kalibrierprozesses gemessen werden. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass die Fehlerkorrektur im Netzwerkanalysator durchgeführt wird, ohne das dafür ein externer Computer wie beim Deembedding erforderlich ist. Die einfachste Form einer direkten Messung ist die Response-Kalibrierung, eine Form der Normalisierung. Eine Referenzkurve wird in einem Speicher abgelegt und darauffolgende Bildkurven werden als Daten, dividiert durch die abgespeicherte Kurve, angezeigt. Eine Response-Kalibrierung erfordert nur einen Standard; es können nur Übertragungsmessungen durchgeführt werden.

Die Zweitor-Kalibrierung (Full Two-Port) ist eine Form der vektoriellen Fehlerkorrektur und erzeugt viel genauere Messungen im Vergleich mit einer Response-Kalibrierung. Sie

erfordert auch mehr Kalibrierstandards. Es gibt prinzipiell zwei Typen von Zweitorkalibrierungen: Short-Open-Load-Thru (SOLT) und Thru-Reflect-Line (TRL). Diese sind nach den Typen von Kalibrierstandards bezeichnet, die im Kalibrierprozess benutzt werden.

Der Response-Kalibrierung haftet eine ernsthafte Schwäche an, weil keine Korrektur von Quellen- und Lastanpassungsfehlern durchgeführt werden kann. Dies ist besonders dann ein Problem, wenn Übertragungsmessungen an Objekten niedriger Dämpfung oder Reflexionsmessungen durchgeführt werden sollen. Die Anwendung der Response-Kalibrierung in Übertragungsmessungen an Objekten niedriger Dämpfung kann eine erhebliche Messunsicherheit in Form von Welligkeiten hervorrufen. Die Messunsicherheit hängt von der relativen Fehlanpassung von Testhalterung und Netzwerkanalysator, verglichen mit dem Messobjekt ab.

Wenn die Response-Kalibrierung für Übertragungsmessungen mit Halterungen eingesetzt wird, kann eine erhebliche Verbesserung der Messgenauigkeit erzielt werden, indem man zunächst eine Zweitor-korrektur an den Enden der Testkabel durchführt. Dies verbessert die effektive Quellen- und Lastanpassung des Netzwerkanalysators, was die Messwertwelligkeiten aufgrund von Reflexionen der Halterung und der Anschlüsse des Analysators reduziert.

Die Zweitor-Kalibrierung (Abb. 1) ist die genaueste Form der Fehlerkorrektur, weil sie alle größeren Quellen systematischer Fehler berücksichtigt, die im Zusammenhang mit Netzwerkmessungen stehen. Diese Fehler sind hier gezeigt. Die Lecksignal-Fehler sind Richtschärfe und Übersprechen. Signalreflexionsfehler sind Quellen- und Lastanpassung. Die letzte Klasse von Fehlern steht im Zusammenhang mit dem Frequenzgang der Empfänger. Diese Fehler werden Reflexions- und Übertragungsfrequenzgang genannt. Das Full-Two-Port-Fehlermodell beinhaltet alle sechs dieser Terme für die Vorwärtsrichtung und dieselben sechs Terme (mit anderen Daten) in Rückwärtsrichtung, was eine Gesamtanzahl von zwölf Termen ergibt. Deshalb wird für die Full-Two-Port-Kalibrierung auch oft der Begriff Zwölfterm-Fehlerkorrektur benutzt.

## Zeitbereichsreflektometrie

Die Zeitbereichsreflektometrie (TDR – time domain reflectometry) ist ein ausgezeichnetes Werkzeug, das es gestattet, die Impedanz als Funktion des Ortes zu betrachten. Es kann zwischen kapazitiven und induktiven Übergängen unterschieden werden, zudem gibt es Übertragungsleitungen, die nicht  $Z_0$  aufwei-

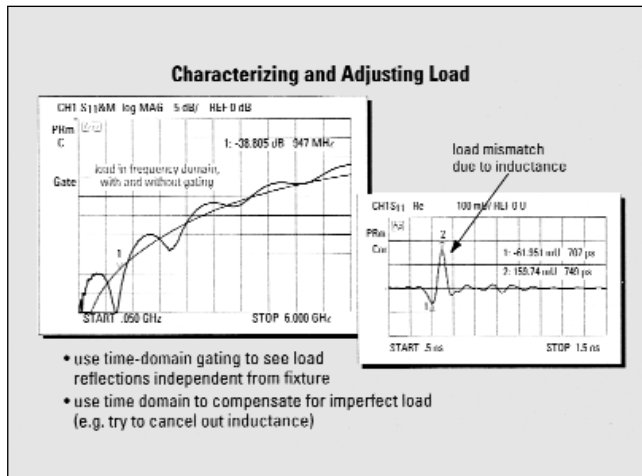


Abb. 5: Vergleichsmessung zwischen dem rechteckigen und dem randmontierten SMA-Stecker

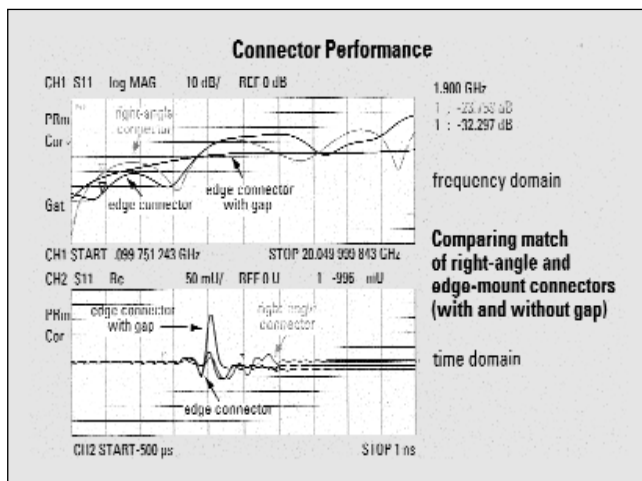


Abb. 6: Anpassungsmessung der zwei Steckerarten

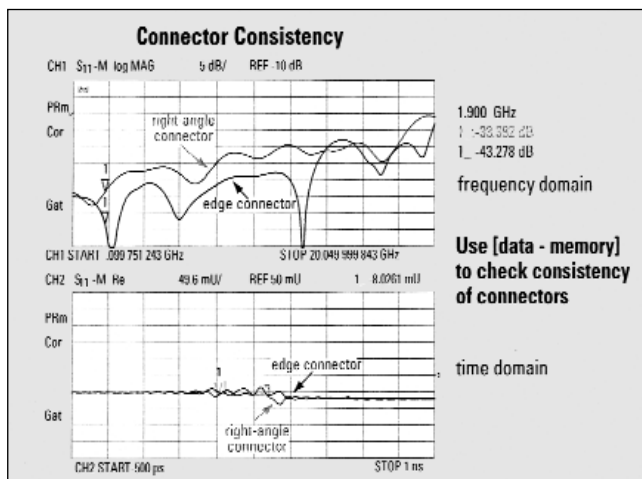


Abb. 7: Konsistenzmessung der zwei Steckerarten

sen. Die TDR hilft dabei, Betrag und Entfernung von Reflexionen der Halterung und der Kalibrierstandards zu bestimmen. Wenn die Halterung entwickelt und hergestellt worden ist, kann mit Hilfe der TDR beurteilt werden, wie gut die Reflexionen unterdrückt werden konnten.

Wenn die örtliche Auflösung ausreichend ist, können die Reflexionen der Steckerüber-

gänge unabhängig von den Reflexionen der Kalibrierstandards betrachtet werden. Mit Time-Domain-Gating kann der Messbeauftragte die verschiedenen Abschnitte der Halterung isolieren und deren Einflüsse im Frequenzbereich sehen. Beispielsweise können nur die Kalibrierstandards oder nur die Steckerübergänge (ohne Interferenzen mit den Reflexionen der Kalibrierstandards) untersucht werden.

Die Ausgangsbasis von TDR-Messungen im Zeitbereich ist eine breitbandige Wobbelung im Frequenzbereich. Die inverse Fouriertransformation wird dazu benutzt, die Frequenzbereichsdaten in den Zeitbereich zu transformieren, was zu TDR-Messergebnissen führt. Unter Verwendung eines Netzwerkanalysators ist die örtliche Auflösung umgekehrt proportional zum Frequenzbereich der Messung, d.h., je höher die Stopfrequenz, desto kleiner die Entfernung, die aufgelöst werden kann. Aus diesem Grunde ist es generell nötig, an der Halterung Mikrowellenmessungen vorzunehmen, um eine ausreichende Auflösung für die Analyse der verschiedenen Übergänge zu erhalten. Indem man eine ausreichende örtliche Trennung zwischen den Übergängen vorsieht, kann die Notwendigkeit einer Mikrowellencharakterisierung vermieden werden, doch dies ergibt sehr große Halterungen. Abbildung 2 zeigt die zusätzliche Auflösung einer 20 GHz-Wobbelung gegenüber einer 6 GHz-Wobbelung im Falle eines Last-Standards in einer Halterung.

Gating kann im Zusammenhang mit Zeitbereichsmessungen dazu benutzt werden, die interessierenden Reflexionen von anderen zu isolieren. Damit Zeitbereichs-Gating effektiv funktioniert, müssen die Zeitbereichsantworten zeitlich (und damit örtlich) gut separiert sein.

Die Abbildung 3 zeigt das Verhalten eines Durchgangsstandards in einer Halterung, die für den Einsatz in der Produktion vorgesehen ist. Die Zeitbereichsdarstellung in Abbildung 3 links zeigt eine erhebliche Fehlanpassung am Ein- und Ausgang des Durchgangs. Der Graph rechts zeigt das Verhalten des Durchgangs im Frequenzbereich, mit und ohne Gating. Es zeigt sich eine ‚Verbesserung‘ in der Rückflussdämpfung (bei 947 MHz) von etwa 7 dB unter Verwendung von Zeitbereichs-Gating, was eine Rückflussdämpfung von etwa 45 dB für den Durchgang ergibt. Die Messung mit Gating ergibt eine genauere Charakterisierung des Durchgangsstandards.

Die Zeitbereichsreflektometrie kann ein sehr hilfreiches Werkzeug sein, wenn es darum geht, das Verhalten unserer Last zu überprüfen. Der Anwender kann die Antwort der Halterung aus-,gaten‘ und nur die vom Laststandard verursachten Reflexionen ansehen, vorausgesetzt, der Analysator verfügt über ausreichend örtliche Auflösung (die Mikrowellen-Vektornetzwerkanalysatoren von Agilent Technologies erfüllen diese Bedingung).

Die glattere Kurve im linken Graph der Abbildung 4 zeigt die Antwort des Laststandards mit Gating, mit einer ziemlich typischen Anpassung von etwa 38 dB bei 1 GHz und ungefähr 30 dB bei 2 GHz. Der rechte Graph zeigt, dass der Laststandard etwas induktiv aussieht, was ebenfalls recht typisch ist.

Es ist möglich, den Laststandard zu justieren, um die unvermeidbaren parasitären Effekte, die das Reflexionsverhalten verschlechtern, zu kompensieren. Zeitbereichs-Gating ist ein ausgezeichnetes Werkzeug, wenn es darum geht, eine geeignete Kompensation zu definieren. Der Einfluss einer kleinen Kapazität, die angefügt wird, um die Induktivität des Laststandards möglichst gut zu kompensieren, führt zu sichtbaren Veränderungen im Zeit- und im Frequenzbereich.

## Probleme in der Praxis

Bei Benutzung von Halterungen auf Leitplattenbasis sind das Verhalten am Steckerübergang und die Qualität (bezgl. Störstellenfreiheit und Wiederholbarkeit der Verbindung) zwischen Steckern sehr wichtig. Um den Effekt der Steckerfehlanpassung bei Benutzung mehrerer Stecker (ein Paar für jeden Kalibrierstandard) vollständig zu entfernen, ist der Messbeauftragte auf ausgezeichnete Qualität zwischen den Steckern angewiesen. In diesem Falle werden die Steckerfehlanpassungen als Teil des Kalibrierprozesses entfernt.

Nachdem die für eine Fallstudie entwickelte Halterung vorlag, stießen das Entwicklungsteam auf zwei Beispiele schlechten Steckerverhaltens bzw. schlechter Wiederholbarkeit. Das erste Problem trat auf, als rechtwinklige SMA-Stecker zum Einsatz kamen. Aufgrund ihrer internen Konstruktion war deren Anpassung sowohl schlecht als auch nicht sehr konsistent (wiederholbar) zwischen Steckern. Das zweite Problem beruhte auf einer fehlerhaften Lötverbindung zwischen dem am Rand der Platine zu montierenden Steckern und der Platine. Weil das Entwicklungsteam keine Kerben in der Platine vorgesehen hatte, die die Schultern der Stecker aufnehmen konnten, konnte kein flacher Übergang erreicht werden. Die daraus resultierende Luftlücke war für eine erhebliche Fehlanpassung verantwortlich. Nach dem Einbau eines richtig montierten Randsteckers führte zu einem zufriedenstellendem Verhalten.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich des rechtwinkligen mit dem randmontierten SMA-Stecker. Im Frequenzbereich ist klar, dass der randmontierte Stecker die kleinste Reflexion erzeugt (etwa 32 dB Anpassung bei 1,9 GHz). Gating wurde benutzt, um die Reflexionen der Kalibrierstandards zu entfernen. Die Zeitbereichsdarstellung zeigt, dass der Randstecker mit der Luftlücke klar induktiv ist.

Abbildung 6 zeigt die Qualität zwischen den Steckern. Für die Messung wurde die Data-minus-Memory-Funktion des Netzwerkanalysators verwendet, um die gemessene Differenz zwischen den Steckern zu zeigen. Die Randstecker haben einen Vorteil von

10 dB gegenüber den rechtwinkligen Stecker bis hinauf zu etwa 12 GHz. Dies ist ein erheblicher Vorteil, weil die von den Steckern stammenden Reflexionen nur unter Verwendung von Fehlerkorrektur auf ein Niveau abgesenkt werden kann, das der Anpassung der Steckern entspricht. Ein Wert von -43 dB (bei 1,9 GHz) ist akzeptabel.

## Stromversorgung des DUT

Der letzte zu behandelnde Punkt im Zusammenhang mit Halterungen liegt darin, wie aktive Bauteile mit Versorgungsspannung zu versehen sind. Wenn Messungen aktiver Objekte in Halterungen durchgeführt werden sollen, muss die Spannungsversorgung zusammen mit dem HF-Signal zugeführt werden. Traditionell wurden bei Transistormessungen externe Bias Tees im Hauptsignalpfad verwendet. Diese Vorgehensweise hat heute noch Gültigkeit, wenn auch oft die in die meisten Netzwerkanalysatoren eingebauten Bias Tees benutzt werden.

Viele gehäuste Verstärker und RFICs erfordern eine Stromversorgung über separate Anschlüsse. Dies bedeutet, dass in der Halterung gesonderte Steckern, DC-Durchführungen, Drähte oder Pins für die erforderliche Stromversorgung vorgesehen werden müssen. Diese Bias-Verbindungen sollten eine niedrige DC-Impedanz aufweisen. Diskrete Elemente können direkt auf der Halterung in der Nähe des Messobjekts angebracht werden, um Bypässe für HF und die erforderliche Isolation für die DC-Pins bereitzustellen. Gute HF-Bypass-Techniken können ausgesprochen wichtig sein, da manche Verstärker oszillieren, wenn HF-Signale in die Stromversorgungsleitungen eingekoppelt werden.

TEST

B.02

www.publish-industry.net

more @ click TK3B0201

