

# Mit hoher Genauigkeit simulieren

## Schnelle Entwicklung präziser 4-Tor-Modelle für differenzielle 40-Gbit/s-Strukturen

Unter Verwendung von Zeitbereichs-Reflektometer- und Vektornetzwerkanalysator-Messdaten lassen sich Simulationen erzeugen, die eng mit der wirklichen physikalischen Steckverbindung übereinstimmen.

MIKE RESSO, JIM MAYRAND,  
DIMA SMOLYANSKY

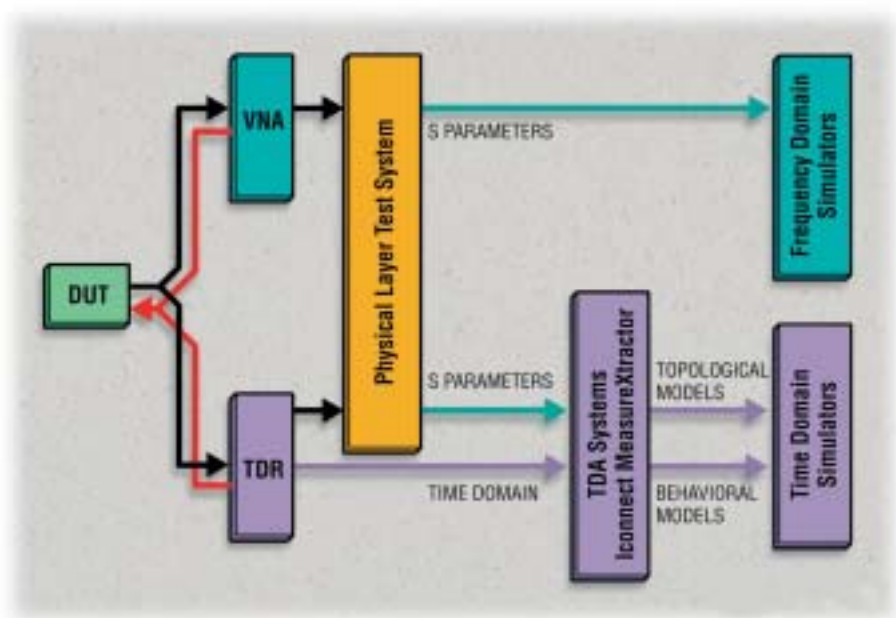


Abb. 1: Es gibt heute diverse Methoden zur Modellierung; die noch relativ neue messdatenbasierte Modellierung bietet Einblick in Hochfrequenzeffekte.

MIKE RESSO ist Produktmanager bei der Signal Integrity Operation von Agilent Technologies.

JIM MAYRAND ist Consultant in San Francisco und Massachusetts und hat sich auf Beratung zum Thema Signalintegrität spezialisiert haben.

DIMA SMOLYANSKY arbeitet derzeit bei TDA Systems an der Entwicklung von Anwendungen für Modellierungswerkzeuge, die die Signalintegrität und den Entwurf von High-Speed-Digitalschaltungen verbessern.

**D**atenübertragung mit 40 Gbit/s über Kupferleitungen ist heute keine theoretische Überlegung mehr, sondern Realität. In Physical Layer-Strukturen stellen die passiven lineare Bauteile, Backplanes, IC-Gehäuse, Kabel und Steckverbindungen in digitalen Hochgeschwindigkeitssystemen keine Engpässe mehr dar. In jüngster Zeit wurden neue 4-Tor-Messverfahren ermöglicht, die es ermöglichen, differenzielle 40-Gbit/s-Strukturen präzise zu modellieren. Bei Messgeräten der neuesten Generation erfordert die Kalibrierung einer 4-Tor-Zeitbereichs-Reflektometrie-Messung nur noch 40 Minuten. Bisher benötigte man dafür bis zu vier Stunden – sofern eine solche Kalibrierung überhaupt möglich war. Die Entwicklung einer neuen Generation von Messwerkzeugen wurde getrieben durch aktuelle PCI-Express- und InfiniBand-Implementationen, die Datenraten um 4 Gbit/s erreichen. Doch neuere Standards wie XAUI, OC-192, 10G Ethernet und OC-768 zielen auf noch höhere Datenraten – bis 40 Gbit/s und darüber hinaus.

Der anhaltende Trend zu immer höheren Datenraten stellt Hardware-Entwickler vor Probleme bei der Signalintegrität.

Bei Daten- und Taktraten oberhalb der 1-Gbit/s-Marke sehen digitale Datenströme nicht mehr aus wie Binärsignale aus dem Lehrbuch, vielmehr beginnen sie, ein analoges Verhalten zu zeigen. Das bedeutet, dass unerwünschte Phänomene, die den Datenfluss in den Signalübertragungsstrukturen behindern könnten – beispielsweise Reflexionen an Impedanz-Stoßstellen, dispersive Dämpfung, Übersprechen, Störstrahlung und Empfindlichkeit gegenüber Störstrahlung – angegangen und unter Kontrolle gebracht werden müssen. Es ist keine Überraschung, dass Entwickler unter diesen Umständen mehr und mehr zu differenziellen Signalübertragungsverfahren übergehen. Die wichtigsten Vorteile der differenziellen Signalübertragung sind: kleinere Spannungshübe, Unempfindlichkeit gegenüber Störeinstreuungen aus dem Netzteil, geringere Abhängigkeit von einer HF-Masseebene und verbessertes EMV-Verhalten.

Da jedoch jede differenzielle Struktur in sich über irgendeiner Ebene symmetrisch ist, ist es für die Signalqualität von entscheidender Bedeutung, wie exakt diese Symmetrie wirklich eingehalten wird. Einfache Impedanz- und Laufzeitmessungen an den Kupferleiterbahnen auf einer Backplane reichen für eine genaue Analyse von Gigabit-Verbindungen nicht mehr aus. Solche Systeme erfordern extrem ausgefeilte Design-Regeln sowie miteinander einhergehende Zeit- und Frequenzbereichs-Analysen.

### Differenzielle Topologien genauer betrachtet

Bei der Diskussion dieser neuen Herausforderungen bezüglich Signalintegritätsprobleme wird klar, warum wir die Problematik differenzieller Topologien verstehen müssen und warum die Moden-Konversionsanalyse ein wichtiges Konzept für den Entwurf von digitalen High-Speed-Verbindungen ist. Ideale differenzielle lineare passive Verbindungen reagieren nur auf / erzeugen nur differenzielle Signale (zwei Signale gleicher Amplitude und entgegengesetzter Polarität). Eine Schaltung von perfekt differenziellem Design würde sehr vorteilhafte Eigenschaften aufweisen und keine unerwünschten In-Phase- (Gleichtakt-) Signale erzeugen. Ein externes Signal, das in eine solche ideale differenzielle Verbindung einstrahlt, wird als Gleichtaktsignal von der Anordnung unterdrückt. Die bekannte Gleichtaktunterdrückung (CMRR, Common Mode Rejection Ratio, gemessen in dB) ist der wohl größte Vorteil differenzieller Topologien. Nicht ideale differenzielle Übertragungsleitungen weisen diese Vorteile nicht auf. Eine differenzielle Übertragungsleitung mit einem nur geringen Grad der Unsymmetrie erzeugt ein Gleichtaktsignal, das durch das Objekt läuft. Die abgestrahlten Gleichtaktsignale stammen in der

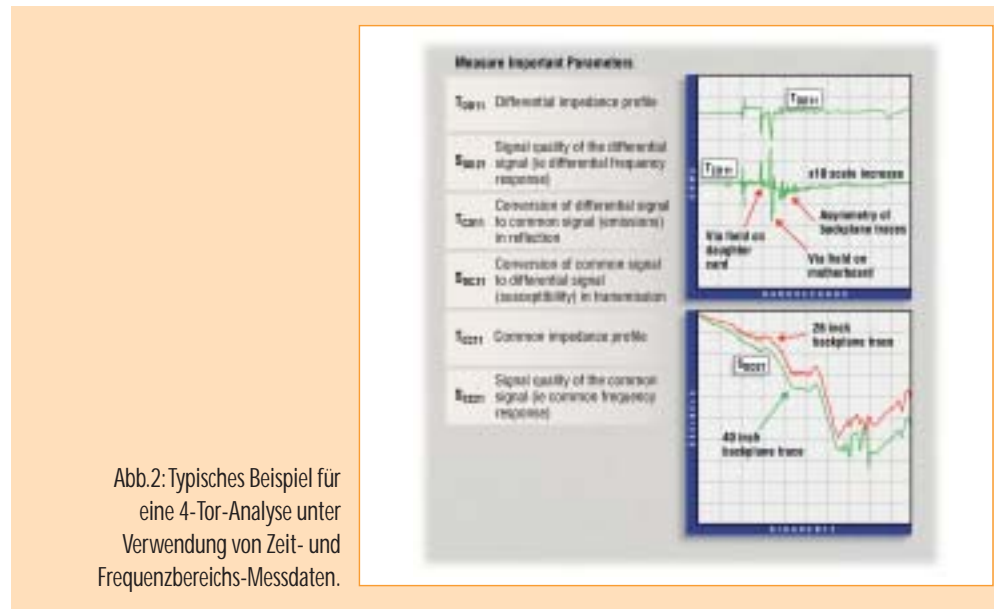


Abb.2: Typisches Beispiel für eine 4-Tor-Analyse unter Verwendung von Zeit- und Frequenzbereichs-Messdaten.

Regel von benachbarten HF-Schaltungsteilen oder Taktsignal-Oberwellen. Eine sorgfältig "designte" differenzielle Schaltung unterdrückt jedoch auch Rauschsignale auf der elektrischen Masseebene, weil diese auf beide Eingänge der differenziellen Leitung einwirken.

Asymmetrien können durch beliebige physikalische Strukturen verursacht werden, die nur in einer Leitung des differenziellen Leiterpaares vorhanden sind, beispielsweise Lötunkte, Zacken, Biegungen oder Einbuchtungen. Diese Modenkonzersion ist eine Quelle von Störaussendungen. Durch eine Modenkonzersionsanalyse lassen sich EMV-Probleme schon in einem früheren Stadium des Entwicklungsprozesses beheben.

### Methoden zur Modellextraktion

Das Flussdiagramm in Abbildung 1 zeigt die für unsere Design-Fallstudie verwendeten Labor-Messgeräte-Konfiguration. Die messdatenbasier-

te Modellextraktion kann nach einer Reihe verschiedener Methoden erfolgen.

Das Ziel besteht darin, ein genaues Modell zu erzeugen, das sich zur Simulation im Zeit- oder Frequenzbereich eignet (rechte Seite von Abb. 1). Die meisten Digitalentwickler bevorzugen Zeitbereichsmodelle, deshalb wollen wir uns auch in diesem Beitrag auf diesen Modelltyp konzentrieren. Es kann entweder ein topologisches Modell oder ein Verhaltensmodell entwickelt werden. Das topologische Modell basiert auf der physikalischen Struktur des Objekts und kann bei einer längeren Schaltung mit mehreren Impedanz-Unstetigkeiten sehr komplex sein. Obwohl die Berechnung solcher Modelle mehrere Iterationen erfordert, genügt dafür heutzutage ein standardmässiger PC.

Das Verhaltensmodell betrachtet eine Schaltung als "Black Box" und beschreibt deren Antwort auf ein bestimmtes Stimulussignal. Ein Typ eines Verhaltensmodell sind die Streuparameter (S-Parameter). ▶

Tabelle 1: Werkzeuge zur Entwicklung von Modellen für differenzielle 4-Tor-Signalübertragung

Werkzeug	Beschreibung
Physical Layer Test System (PLTS) Agilent Technologies Serie N1900	Speziell für die Signalintegritätsanalyse entwickelt. Eine Komplettlösung für die vollständige Charakterisierung differenzieller Hochgeschwindigkeits-Schaltungen im Zeit- oder Frequenzbereich. Ermöglicht die Extraktion von RLCG- (Widerstand / Induktivität / Kapazität / dielektrischer Verlust) Übertragungsleitungs-Modellen, die dann zur Optimierung der Genauigkeit von Modellen und Simulationen verwendet werden können.
TDA Systems Iconnect MeasureXtractor	Ein Werkzeug zur automatischen Extraktion präziser messdatenbasierter Modelle von Signalverbindungen. Leitet aus TDR/T- und S-Parameter-Daten genaue, frequenzabhängige Modelle ab.
Vektornetzwerkanalysator (VNA) der PNA-Familie von Agilent Technologies	Beaufschlagt das Messobjekt mit einem präzisen, gewobbelten Sinussignal und misst dessen Antwort mit einem schmalbandigen, synchron zur Stimulussignalfrequenz abgestimmten Empfänger.
Zeitbereichs-Reflektometer (TDR) der 86100-Familie von Agilent Technologies	Beaufschlagt das Messobjekt mit einem steiflankigen, überschwingungsarmen Stufensignal und misst die Antwort mit einem breitbandigen Empfänger.

### Erforderliche Messgeräte

Für Messungen an Prototypen kann wahlweise ein Zeitbereichs-Gerät wie z. B. ein Zeitbereichs-Reflektometer (TDR, Time Domain Reflectometer) oder ein Frequenzbereichs-Gerät wie z. B. ein Vektornetzwerkanalysator (VNA) verwendet werden.

In der Regel ist ein TDR einfacher zu benutzen, wogegen ein VNA genauere Ergebnisse liefert. Im vorliegenden Experiment wurden die Messungen mit einem VNA durchgeführt, der von der Physical Layer Test System-(PLTS-) Software Agilent N1930A über die GPIB-Schnittstelle gesteuert wurde. Diese Software bietet einen Kalibrierassistenten, der den fehlerträchtigen, höchste Sorgfalt erfordernden Kalibrierprozess wesentlich vereinfacht. Die resultierenden 4-Tor-S-Parameterdaten wurden an das TDA Systems IConnect MeasureXtractor Model Extraction Tool übergeben, das daraus ein präzises Zeitbereichs-Hspice-Modell ableitete. Zur Modell-extraktion wurde der TDA Systems IConnect MeasureXtractor verwendet. Der Grund dafür war die einfache Benutzbarkeit dieses Werkzeugs. Dieses Extraktionswerkzeug importiert die von einem TDR oder VNA gelieferten

Impedanzprofil- oder 4-Tor-S-Parameter-Daten. Das resultierende Modell kann, nachdem es auf einem Laptop-PC in mehreren Iterationsschritten verfeinert wurde, direkt in einen Simulator wie Hspice, Spectraquest oder Smart Spice übernommen werden.

Durch die schnelle Vergleichsmöglichkeit von Mess- und Simulationsergebnissen ist dies ein effizienter Ansatz zur Überprüfung der Genauigkeit der Modelle.

### Typische 4-Tor-Messsysteme

Zur Extraktion messdatenbasierter Modelle für differenzielle Schaltungen wird ein 4-Tor-Messsystem benötigt. Ein präzise kalibriertes und kontrolliertes Stimulussignal wird an den Eingang des Messobjekts angelegt; das resultierende Ausgangssignal wird mit einem (in demselben Messgerät enthaltenen) Empfänger gemessen. Mit diesem Stimulus/Response-Test wird die reflektierte und die übertragene Antwort sowohl massebezogen als auch differenziell gemessen. Das Zeitbereichs-Reflektometer beaufschlagt das Messobjekt hierzu mit einem steiflankigen Stufensignal geringen Überschwingens und

misst die Antwort mit einem breitbandigen Empfänger. Der VNA hingegen verwendet ein sinusförmiges, gewobbeltes Stimulussignal und misst die Antwort mit einem schmalbandigen Empfänger, dessen Mittenfrequenz synchron zur Stimulussignalfrequenz geführt wird.

Dieser schmalbandige Empfänger ermöglicht das geringe Rauschen und die hohe Dynamik des VNAs. Ein

4-Tor-Messsystem – ganz gleich, ob Zeitbereich- oder Frequenzbereich-basiert – ermöglicht auch Mixed-Mode-Messungen, bei denen die Gleichtakt-Antwort auf einen differenziellen Stimulus und die Gegentakt-Antwort auf einen Gleichtakt-Stimulus erfasst werden. Bei dieser Analyse werden etwaige Anomalien erkannt, die durch Asymmetrien innerhalb der differenziellen Struktur hervorgerufen werden.

### Tipps zur Analyse einer differenziellen Struktur

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die zur Charakterisierung einer differenziellen Struktur angewandte Methodik. Im ersten Schritt geht es darum zu verstehen, was die 16 S-Parameter bedeuten und welche Informationen sich aus den oft sehr großen Datenmengen gewinnen lassen. In Schritt 2 werden diese 16 S-Parameter gemessen. Für diese Messung kann ein Frequenzbereichs-Messgerät oder ein Zeitbereichs-Messgerät verwendet werden.

In Schritt 3 wird die Höhe der Dämpfung in der differenziellen Struktur gemessen, indem man die Einfügungsdämpfung bei differenziellem Eingangssignal beobachtet (SDD21). Daraus ergeben sich auch wertvolle Informationen über die Bandbreite des Messobjekts.

Eine sorgfältige Analyse der Modenkonzersion (Schritt 4) ist ebenfalls sehr hilfreich. Man kann ein Design optimieren, indem man das Ausmaß der Modenkonzersion (in Prozent der Eingangssignalamplitude) bestimmt und dann untersucht, an welcher Stelle der Struktur eine Anomalie vorliegt.

In manchen Fällen ist es nützlich, die Reziprozität zu bestimmen (Schritt 5). Anhand der Vorwärts- und Rückwärts-Transmissionsmessdaten lassen sich etwaige vom TDR hervorgerufene Maskierungseffekte eliminieren; damit lässt sich die Richtungsabhängigkeit des Messobjekts klären. Die von einem 40-GHz-Vektornetzwerkanalysator gelieferten 4-Tor-S-Parameter-Messdaten wurden von der Software Agilent PLTS im Touchstone-Format (.s4p) direkt an das Modell-extraktionswerkzeug TDA Systems IConnect übergeben. Das Modell wurde iterativ innerhalb von IConnect verfeinert und optimiert. Danach wurde auf der Basis des Modells ein 40-Gbit/s-Augendiagramm simuliert. Dieses wurde mit dem von den internen PLTS-Augendiagramm-generator-Algorithmen abgeleiteten 40-Gbit/s-Augendiagramm verglichen.

Die beiden simulierten Augendiagramme zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. Das bedeutet, mit einem einzigen Messsystem liegen Zeit- und Frequenzbereichs-Informationen vor, die schnell Design-Fehler anzeigen, die sonst die System-performance beeinträchtigen würden. ■

Weiterführende Infos auf [www.duv24.net](http://www.duv24.net)

more @ click DV064401 >

