

Balunlose Messung von Mixed-Mode-Streuparametern

Bedeutung von s_{dd21} in der HF-Technik

Nicht nur die zunehmende Datenmenge, sondern auch deren enorm gestiegene Übertragungsgeschwindigkeit stellen hohe Anforderungen an die Signalqualität. Besonders deutlich wird dies an der aktuellen Schnittstelle USB 3.0, die wegen ihrer Übertragungsgeschwindigkeit von 5 Gbps auch den Beinamen SuperSpeed trägt. Reichte bei der Vorgängerversion USB 2.0 mit 480 Mbps noch eine Gleichtaktdrosselspule aus, um die Signalqualität zu garantieren, sind nun spezielle HF-Bauelemente für die Rauschunterdrückung notwendig. Wodurch diese sich unterscheiden, zeigt die S_{dd21} -Messung.

Streuparameter, kurz S-Parameter, sind ein Maß dafür, wie viel Leistung oder Spannung über einen Port vom Chip zur Leiterplatte übertragen wird. Dabei beschreiben sie das Verhalten linearer elektrischer Komponenten mittels Wellengrößen. Besonders in der Hochfrequenztechnik kommt den Streuparametern eine wichtige Rolle zu, da in vielen Fällen Strom und Spannung nicht eindeutig definiert werden können. Messbar ist jedoch die in einen Port einlaufende Welle bzw. von einem Port reflektierte Welle. Die Erfassung der Parameter mit den Wellenwiderständen hat zum Vorteil, dass unerwünschte Impedanztransformationen an den Ein- und Ausgängen eines Netzwerks vermieden werden.

Die für die Beschreibung eines Netzwerks benötigte Anzahl an S-Parametern hängt von der Anzahl der Ports ab und ergibt sich aus dem Quadrat seiner Port-Zahl. Ein Filterelement mit zwei Ein- und zwei Ausgängen (Abbildung 1), ein 4-Port-Element, wird mit 16 Streuparametern (Abbildung 2) beschrieben.

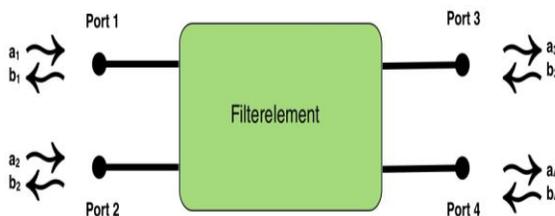


Abbildung 1: 4-Port-Filterelement mit ein- (a) und auslaufenden (b) Leitungswellen

Die Streumatrix stellt dabei den Zusammenhang zwischen den einzelnen eingehenden Wellen a_1 , a_2 , a_3 , a_4 und den reflektierten Wellen b_1 , b_2 , b_3 , b_4 dar.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

Abbildung 2: Streumatrix eines 4-Port-Filterelements

Die Streumatrix ist von der Bezugsimpedanz Z_0 , dem Leitungswellenwiderstand, abhängig, welche in der HF-Technik für gewöhnlich zu 50Ω gewählt wird. Netzwerkanalysatoren messen die S-Parameter als Funktion der Frequenz und geben diese als dimensionslose komplexe Zahl an, die häufig in Dezibel und Phase umgerechnet wird. Im Prinzip lassen sich alle Messobjekte mit mehr als zwei Ports mit einem zweitorigen Netzwerkanalysator vermessen. Alle Tore, die gerade nicht vermessen werden, müssen dabei mit der Bezugsimpedanz verbunden sein. Um alle S-Parameter zu bestimmen, sind mit dieser nodalen Methode $n(n - 1)/2$ komplette 2-Tor-Messungen notwendig. Dieses Verfahren ist zum einen sehr zeit- aufwändig und lässt sich wegen der manuellen Kontaktierung des koaxialen Messanschlusses oder von On-Wafer-Messspitzen nicht automatisieren. Zudem führen parasitäre Einflüsse zu einem Messfehler.

Physikalische und mathematische Baluns

Mit Baluns lässt sich ein zweitoriger Netzwerkanalysator auf vier Tore erweitern. Je nach Aufbau des Baluns mit 0° - oder 180° -Phasendifferenz zwischen den beiden Ausgängen lässt sich die Gleichtakt-Mode oder die Gegentakt-Mode anregen. Auch diese Methode birgt zwei Nachteile: Aufgrund der modalen Anregung müssen für die Kalibrierung des Messsystems den Moden angepasste Kalibrierstandards entwickelt und angefertigt werden. Den zweiten liefert der Frequenzgang des Leistungsteilers. Für die Gleichtakt-Anregung kann der Leistungsteiler aus Widerständen und somit mit einer großen Bandbreite hergestellt werden. Dagegen ist die Einhaltung der 180° -Phasenverschiebung nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich möglich. Die balungsgestützte Messtechnik lässt sich nur bis 1,2 bzw. 1,5 GHz betreiben.

Soll ein Mehrtor auf sein Verhalten bei Gegentakt- oder Gleichtakt-Anregung untersucht werden, ist ein modales Messsystem nötig. Ein Problem stellt jedoch die synchrone Anregung mehrerer Ports dar. Das Messsignal zwischen den beiden Messtoren muss über den gesamten Frequenzbereich eine definierte Phasenverschiebung einhalten. Für die Anregung mit der Gleichtaktwelle beträgt diese 0° und für die Gegentaktwelle 180° . Die modale Anregung lässt sich allerdings umgehen, indem das modale Verhalten aus den portbezogenen Streuparametern berechnet wird^[1].

Mixed-Mode-Streuparameter

Modale Streuparameter, auch Mixed-Mode-Streuparameter genannt, erlauben gegenüber den nodalen Parametern eine differenzielle Auswertung der Reflexion sowie Transmissionsparameter beliebiger 4-Ports. Dafür werden zwei nodale Ports gedanklich zu einem differentiellen Port zusammengefasst (Abbildung 3). Die Mixed-Mode-S-Parameter-Messung hat gegenüber der traditionellen balungsgestützten Messung den Vorteil, dass diese mathematischen Baluns eine ideale Symmetrieübertragung über einen weiten Frequenzbereich bieten und sich mit Messbereichen bis zu einigen GHz speziell für den HF-Bereich eignen. Darüber hinaus lassen sich sowohl Gleichtakt- als auch Gegentakt-S-Parameter sehr einfach messen und reproduzierbare Ergebnisse erzielen.

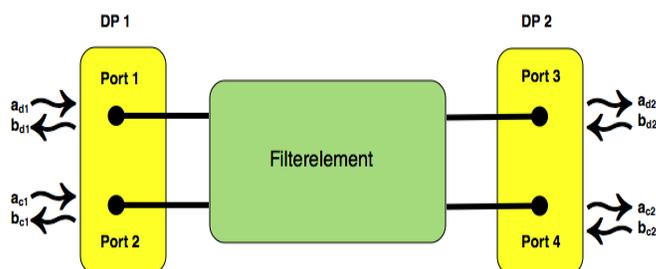


Abbildung 3: Durch das Zusammenfassen zweier nodaler Ports zu einem differentiellen Port, lässt sich ein 4-Port-Filterelement mit einem zweitorigen Netzwerkanalysator vermessen.

Mixed-Mode- und Streuparametermatrix sind ähnlich organisiert: die Spalten repräsentieren die anregenden Ports, die Reihen die empfangenen. Gleichtaktwellen werden in der Gleichung analog zur Streumatrix mit dem Index c gekennzeichnet, Gegentaktwellen mit dem Index d.

Für die Bewertung von Filterschaltungen sind vorrangig die Parameter der Gleich- und Gegentakttransmission s_{cc21} und s_{dd21} von Bedeutung (Abbildung 4). Speziell bei der Messung hochfrequenter differentieller Datensignale wird die Einfügedämpfung s_{dd21} betrachtet, da sie Aufschluss darüber gibt, ob der eingekoppelte Gegentakt phasengleich auch am Ausgang vorliegt.

$$\begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} s_{dd11} & s_{dd12} & s_{dc11} & s_{dc12} \\ s_{dd21} & s_{dd22} & s_{dc21} & s_{dc22} \\ s_{cd11} & s_{cd12} & s_{cc11} & s_{cc12} \\ s_{cd21} & s_{cd22} & s_{cc21} & s_{cc22} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix}$$

Abbildung 4: Mixed-Mode-Streumatrix eines 4-Port-Filterelements: **dd** Gegentaktbetrieb, **cc** Gleichtaktbetrieb, **dc** Gleichtakt-Anregung – Gegentakt-Antwort, **cd** Gegentakt-Anregung – Gleichtakt-Antwort

Gegentaktstörungen breiten sich gleichsinnig mit dem Nutzsignal aus, weshalb bei differentiellen Impulsleitungen die Phasen der beiden Signale synchron auf beiden Leiterbahnen laufen müssen. Das bedeutet auch, dass diese Leitungen an jeder beliebigen Stelle zwischen Sender und Empfänger identische Eigenschaften haben und auch nahezu gleiche elektrische Längen aufweisen müssen. Ist dies nicht der Fall, treffen die an den Empfängern reflektierten Wellen durch die unterschiedlichen Phasenlaufzeiten der Signale auf den Leitungen 1 und 2 nicht mehr mit einer Phasenverschiebung von 180° am Verzweigungspunkt ein. Ein Teil der Gegentaktsignale wird in Gleichtaktenergie umgewandelt. Dadurch entstehen parasitäre Überlagerungen und zusätzliche Reflexionen. Die Phasenverschiebung ist frequenzabhängig. Bei Hochfrequenzleitungen hängt der Wellenwiderstand zusätzlich von den Abmessungen der Leiter ab. Ist das Kabel länger als die Wellenlänge, wie es im HF-Bereich vorkommt, wird es zu Leitungsreflexionen kommen, wenn die Impedanzverhältnisse innerhalb des Systems nicht angepasst wurden. Aus diesem Grund wird die Eignung eines Leitungsfilters für ein System mit der s_{dd21} -Messung geprüft.

Messaufbau und Ergebnisse

Untersucht wurden die stromkompensierten Drosseln der Serie WE-CNSW, die Hochfrequenz-Varianten WE-CNSW HF sowie Bauelemente von Mitbewerbern (Tabelle). Die Bauelemente werden auf die Mitte einer Prüfplatine aufgebracht und an den äußeren Enden der Leitungen mit jeweils einem SMA-Konnektor verbunden. Nun wurde an beiden Signalpfaden der Drossel ein differentielles Signal eingespeist. Die bei -3 dB definierte Grenzfrequenz f_c gibt an, ab welcher Frequenz eingespeistes und reflektiertes differentielles Signal nicht mehr um 180° phasenverschoben sind, bzw. ab wann das Nutzsignal durch den Gegentakt parasitär überlagert und dessen Qualität zu stark beeinflusst wird. Ein Netzwerkanalysator berechnet die Einfügedämpfung s_{dd21} aus den nodalen Streuparametern.

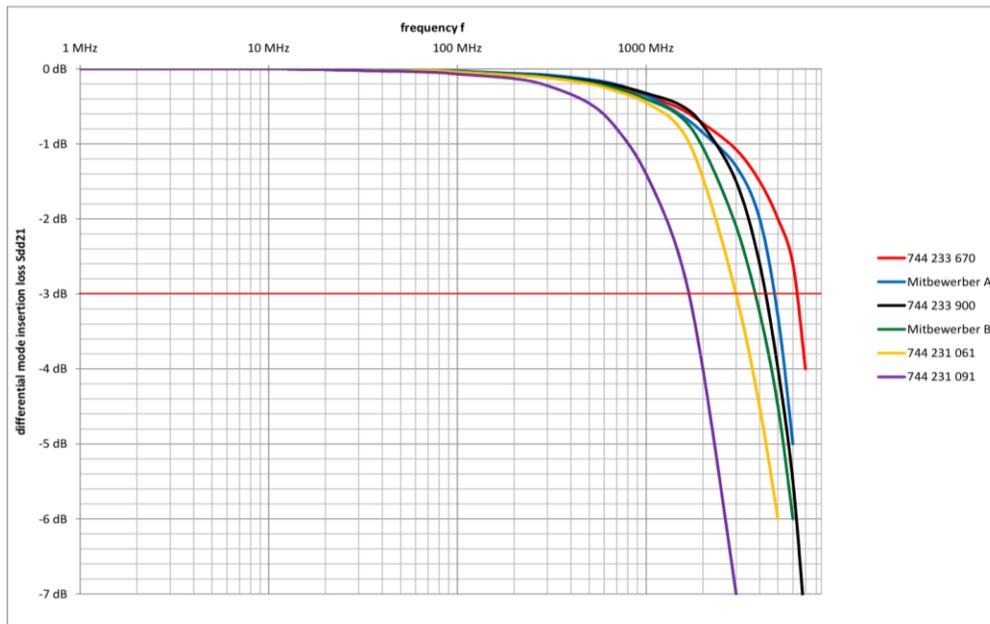


Abbildung 5: Ergebnisse der S_{dd21} -Messung. Als Referenz wurde die Grenzfrequenz f_c bei -3 dB definiert. Die LeistungsfILTER der Serie WE-CNSW HF erreichen hier ein Maximum bei 6,5 GHz.

Weil Gleichtaktinduktoren für Gleichtaktsignale eine hohe Impedanz aufweisen und für differentielle Gegenaktssignale eine wesentlich niedrigere Impedanz darstellen, lässt sich mit diesen Filterelementen die Gleichtaktunterdrückung von differentiellen Übertragungssystemen und damit die Störfestigkeit erhöhen. Die Konformität zur EMV-Richtlinie ist damit gewährleistet.

Der Unterschied der Filter speziell für Hochgeschwindigkeitsdatenleitungen wie für USB 3.0 lässt sich am besten durch den direkten Vergleich der LeitungsfILTER WE-CNSW HF 744233670 mit einer Gleichtaktimpedanz von $67 \Omega @ 100 \text{ MHz}$ und der Filter des Mitbewerbers A mit einer Gleichtaktimpedanz von $60 \Omega @ 100 \text{ MHz}$ erläutern. Obwohl beide über eine hohe Gleichtaktindämpfung verfügen, fällt die Grenzfrequenz der HF-Bausteine der Serie WE-CNSW mit 6,5 GHz um 1 GHz höher aus. Das bedeutet, dass der Einfluss von Unsymmetrien auf differentielle Datensignale der HF-Bausteine von Würth Elektronik mit zunehmender Frequenz geringer ist als die der Wettbewerbsprodukte. Die Gründe hierfür liegen zum einen in einem speziellen Ferritmaterial und zum anderen in der Wickelgeometrie, die sich durch größere Abstände zwischen zwei Windungen auszeichnet. Weil alle der vier betrachteten Filter die gleiche Bauform haben, 0805, ist ein größerer Abstand zwischen den Windungen gleichbedeutend mit einer kleineren Windungszahl. Je weniger Windungen, desto niedriger die Impedanz und desto mehr verschiebt sich der Resonanzpunkt in Richtung höherer Frequenzen. Bezogen auf die S_{dd21} -Messung bedeutet dies: Je niedriger die Gleichtaktimpedanz, desto besser die Filtereigenschaften in differentiellen Hochgeschwindigkeitsdatenleitungen.



Fazit

Mit der s_{dd21} -Messung konnte gezeigt werden, dass sich die HF-Varianten der Serie WE-CNSW stromkompensierter Datenleitungsfilter für die Gleichtaktunterdrückung bei Übertragungsfrequenzen bis 6,5 GHz eignen, ohne differentielle Datensignale zu beeinflussen. Herkömmliche stromkompensierte Filter können dieser Anforderung nicht standhalten, wie die Ergebnisse der Messung gezeigt haben.

Erst durch spezielle Hochfrequenzbauelemente ist die Signalqualität bei der Kommunikation über die USB 3.0-Schnittstelle gewährleistet.

Artikelnummer	Bauform / Baureihe	Grenzfrequenz f_c ($S_{DD21} = -3\text{dB}$)	Impedanz Z (bei 100 MHz)	maximale Betriebs- spannung U_R	Gleichstrom- widerstand R_{DC}	Nennstrom I_R	Anwendung
744 233 670	WE-CNSW 0805 HF	6,5 GHz	67 Ω	50 V	240 m Ω	320 mA	USB 3.0
Mitbewerber A	Bauform 0504	5,0 GHz	60 Ω	50 V	500 m Ω	280 mA	USB 3.0
744 233 900	WE-CNSW 0805 HF	4,5 GHz	90 Ω	50 V	300 m Ω	280 mA	HDMI
Mitbewerber B	Bauform 0504	3,8 GHz	90 Ω	50 V	500 m Ω	280 mA	HDMI
744 231 061	WE-CNSW 0805	3,0 GHz	67 Ω	50 V	250 m Ω	400 mA	
744 231 091	WE-CNSW 0805	1,7 GHz	90 Ω	50 V	300 m Ω	370 mA	USB 2.0

Tabelle 1: Spezifikationen der gemessenen Bauelemente

[1] Dipl.-Ing. Christof Ziegler, 4-Tor-Netzwerkanalyse und On-Wafer-Messtechnik zur Bestimmung modaler Streuparameter bis 50 GHz