

4/10: HF-Technik – keine Hexerei

Messinstrumente der HF-Technik

«Wer misst, misst Mist!», hiess früher ein viel zitierter Satz in der Messtechnik. Nun, ganz ohne Messungen kommt man meist doch nicht aus. Damit oben erwähnter Satz für die HF-Technik nicht zutrifft, müssen einige Grundkonzepte der HF-Messtechnik verstanden sein, bevor man zum eigentlichen Messvorgang schreitet. Dieser Artikel beschreibt zwei der wichtigsten HF-Messinstrumente, den Spektrumanalysator und den vektoriiellen Netzwerkanalysator.



Prof. Dr. Heinz Mathis
Dozent für
Mobilkommunikation
HSR Hochschule für Technik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
Tel. 055 222 45 95
Fax 055 222 44 00
heinz.mathis@hsr.ch
<http://mk.hsr.ch>

Die Hochfrequenzmesstechnik findet ihren Ursprung bei Heinrich Hertz, nach dem auch die Einheit der Frequenz benannt ist. Wie in der Elektrotechnik üblich, werden dabei einerseits Signale, andererseits Systemcharakteristiken ausgemessen. Bei Signalen ist vor allem die Frequenz, die Leistung und damit verbunden das spektrale Aussehen von Interesse. Bei modulierten Signalen werden weitere Parameter wie die Abweichung vom Idealwert, das Phasenrauschen usw. gemessen. Bei Systemen interessiert man sich in der Regel für den frequenzabhängigen Amplituden- und Phasengang, aber auch für die Rauschzahl und den Linearitätsbereich (z. B. bei Verstärkern).

Im vorliegenden Artikel beschäftigen wir uns mit zwei weit verbreiteten Messgeräten der HF-Technik: dem Spektrumanalysator und dem Netzwerkanalysator. Diese beiden Messinstrumente werden gerne verwechselt. Grundsätzlich ist es so, dass der Spektrumanalysator ein unbekanntes Signal in Bezug auf dessen spektrale Anteile untersucht, während der Netzwerkanalysator ein System oder eben ein Netzwerk (im Sinne einer elektronischen Schaltung und nicht z. B. ein Computernetzwerk) bzw. dessen Frequenzgang vermisst.

Das Prisma der Elektrotechnik

Bei der spektralen Analyse geht es um die Aufspaltung eines Signals in seine Frequenzanteile, ganz ähnlich, wie das ein Prisma mit dem sichtbaren Licht macht (Bild 1). Die Frequenzanteile liegen natürlich in einem Frequenzbereich weit unterhalb des sichtbaren Lichtes, sodass wir zur Anzeige einen Bildschirm brauchen, dessen horizontale Achse normalerweise der Frequenz entspricht und des-

sen vertikale Achse die zu vermessende Grösse anzeigt, z. B. die Intensität.

Es existieren zwei Typen von Spektrumanalysatoren: FFT-basierte Analysatoren und durchstimmbare Spektrumanalysatoren, die ähnlich wie ein Radio funktionieren. Der FFT-Analysator tastet einen Signalausschnitt ab und speichert diesen in seinem Memory. Anschliessend kann er «in aller Ruhe» die Fouriertransformation dieses Signalstücks berechnen und anzeigen. Die Fouriertransformation überführt also ein zeitlich geordnet vorliegendes Signal in den Frequenzbereich. Dies wird meist von einem Mikrocomputer oder von einem digitalen Signalprozessor (DSP) erledigt. Bei diesem Messprinzip wachsen die Ansprüche an die Abtastung wegen der hohen Frequenzen in der HF-Technik stark an. Deshalb werden hier meist durchstimmbare Spektrumanalysatoren verwendet. Das Blockschaltbild eines solchen HF-Spektrumanalysators ist in Bild 2 dargestellt.

Das Herz der Schaltung ist der Rampen-

generator. Sein ständig steigender Ausgangswert bestimmt die Frequenz, die gerade analysiert wird (sozusagen die Funktion Sendersuchlauf beim Radio). Dieser Wert steuert die Frequenz des spannungsgesteuerten Oszillators (VCO). Dieses Signal wiederum wird mit dem gefilterten einkommenden Signal multipliziert (gemischt), wobei Signale bei der Summen- und der Differenzfrequenz des Eingangs- und des Oszillatorsignales entstehen. Interessant ist die Differenzfrequenz, die auf der so genannten Zwischenfrequenz (ZF) liegt. Diese wird schmalbandig herausgefiltert und weiter verstärkt. Der anschliessende Leistungsdetektor bestimmt die Leistung bei dieser ZF. Die ZF entsteht nur,

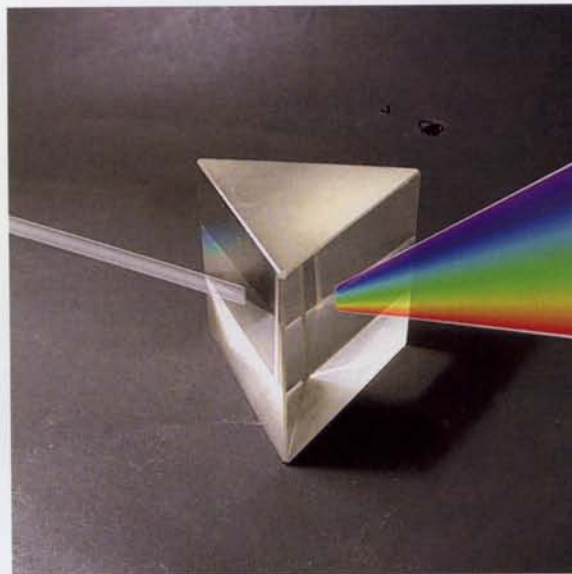


Bild 1: Das Prisma fächert die spektralen Anteile des Lichts auf

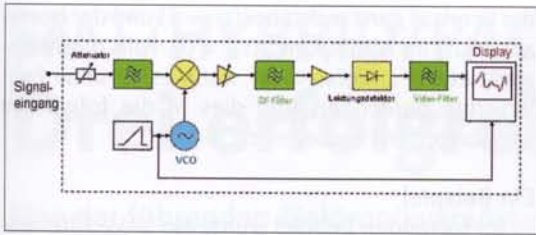


Bild 2: Blockschaltbild eines Spektrumanalysators, wie er in der HF-Technik eingesetzt wird

wenn bei der Summenfrequenz der aktuellen VCO-Frequenz und der ZF ein HF-Signal vorliegt. Deshalb kann man mittels Leistungsanalyse des ZF-Signals direkt auf die vorliegende Leistung bei der Summenfrequenz schliessen. Diese Information wiederum wird an die vertikale Ablenkung der Bildschirmanzeige weitergegeben. Steuert die Rampe nicht nur den VCO, sondern gleichzeitig auch die horizontale Ablenkung der Bildschirmanzeige, entsteht die Aufzeichnung der Leistung in Funktion der Frequenz. Solche spektralen Messungen werden z.B. in Bewilligungsverfahren neuer GSM-Basisstationen eingesetzt.

Der König der HF-Messgeräte

Im Gegensatz zum Spektrumanalysator, der nur einen Eingang für das zu messende Signal aufweist, besitzt der Netzwerkanalysator auch einen Ausgang, der das Signal dem zu vermessenden, in der Regel linearen Netzwerk zuführt. Die Frequenz dieses Signals wird ähnlich wie beim Spektrumanalysator mit einem Rampengenerator gesteuert. Stimuliert durch dieses Signal wird das Netzwerk (DUT, device under test) ein Signal mit derselben Frequenz, aber einer unbekanntem Amplitude und Phase produzieren. Die Vermessung dieser beiden Parameter

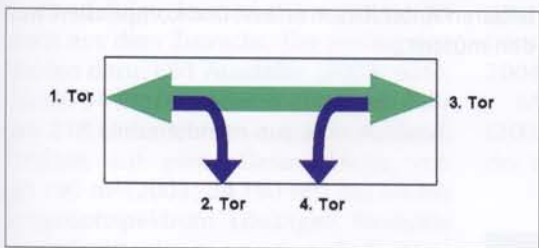


Bild 3: Der Richtkoppler ist eines der zentralen Elemente des Netzwerkanalysators

in Abhängigkeit der Frequenz wird als vektorielle Netzwerkanalyse (VNA) bezeichnet. Bei einem Eintor ist der Ein- und der Ausgang dasselbe. Die Messung des vom Eintor reflektierten Signals entspricht daher dem im vorletzten Artikel eingeführten Reflexionskoeffizienten r . Beim Zweitor unterscheiden wir den Reflexionskoeffizienten s_{11} und den Transmissionskoeffizienten s_{21} . Beide Parameter sind dabei komplexwertig (Betrag und Phase) und frequenzabhängig. Die Herausforderung des Netzwerkanalysators besteht dabei in der Messung des vom Netzwerk reflektierten Parameters, weil dieser am selben Port anliegt wie das Stimulussignal. Man bedient sich dabei eines so genannten Richt-

kopplers, der unterscheiden kann, aus welcher Richtung eine HF-Welle kommt. Bild 3 zeigt die prinzipielle Funktion eines Richtkopplers.

Das Signal wird normalerweise am 1. Tor angelegt. Der Hauptteil der Leistung geht dabei zum 3. Tor. Ein kleiner Teil der Leistung wird am 2. Tor ausgekoppelt. Wird wegen Fehlanpassung am 3. Tor ein Teil der Leistung reflektiert, kommt der Hauptteil wieder am 1. Tor raus, ein kleiner Teil wird beim 4. Tor ausgekoppelt. Wichtig ist, dass von dieser Reflexion nichts am 2. Tor erscheint, genauso wie vom einkommenden Signal am 1. Tor nichts am 4. Tor erscheinen darf. Diese richtungssensitive Trennung zeichnet den Richtkoppler aus.

Im Netzwerkanalysator wird der Richtkoppler eingesetzt, um die ausgehende und reflektierte Leistung richtig zu vermessen. Das Blockschaltbild eines vektoriellen Netzwerkanalysators ist in Bild 4 dargestellt.

Der Rampengenerator steuert zwei Oszillatorsignale. Eines dient zur Vermessung des Netzwerkes, das zweite ist das um die Zwischenfrequenz versetzte Signal für den andern Mischereingang.

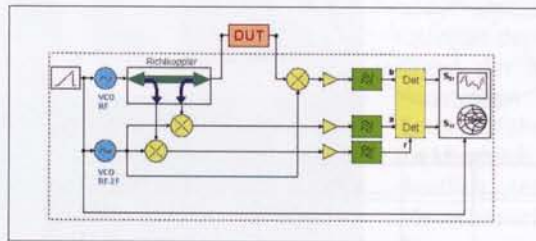


Bild 4: Blockschaltbild eines vektoriellen Netzwerkanalysators. Das zu vermessende Netzwerk wird als DUT (device under test) bezeichnet

Mit dem Richtkoppler wird ein Referenzsignal erzeugt. Ebenfalls aus dem Richtkoppler kommt das Signal für das Netzwerk und ein Teil mit dem vom Netzwerk reflektierten Anteil. Am zweiten Tor des Netzwerkes kommt ebenfalls ein Signal heraus. Alle drei Signale werden mit separaten Mischern heruntergemischt, verstärkt und gefiltert und liegen anschliessend als Reflexionssignal a , Transmissionssignal b oder Referenzsignal r vor. Die Detektionsstufe hat dann nur noch die Aufgabe, den Quotienten a/r für eine s_{11} -Messung bzw. den Quotienten b/r für eine s_{21} -Messung zu ermitteln. Betrag und Phase der s -Parameter können anschliessend in verschiedenen Formaten auf dem Display angezeigt werden. Das beim letzten Mal eingeführte Smith-Diagramm ist für die Darstellung von s_{11} gebräuchlich.

Ohne Kalibration geht gar nichts

Weil der Anschluss von Netzwerken an den Netzwerkanalysator in der Regel mittels Kabeln passiert, die selbst einen Amplituden- und Phasengang aufweisen, muss der Netzwerkanalysator vor der Messung kalibriert werden. Es existieren dabei verschiedene Stufen der Kalibration. Für tiefe Frequenzen (unter 100 MHz) und sehr kurze Kabel darf schon mal unkalibriert gemessen werden. Falls nur die Transfercharakteristik, also s_{21} , interessiert, kann die Kalibration mit einem so genannten Thru-Cable vollzogen werden, mit dem man das zu messende Netzwerk überbrückt. Idealerweise werden gerade diejenigen Kabel verwendet, mit denen das

Netzwerk später bei der Messung angeschlossen wird. Sollen zusätzlich Reflexionsmessungen gemacht werden, wird die Kalibration aufwändiger, weil Fehlerterme von verschiedenen Quellen, wie z.B. dem Richtkoppler, kompensiert werden müssen. Für die Kalibration bedient man sich eines Sets von Kalibrationsstandards. Meist umfasst ein solches Set drei Abschlüsse: einen Kurzschluss, einen hochohmigen Abschluss (Leerlauf) und einen Normabschluss (z.B. 50 Ω). Diese Abschlussimpedanzen liegen als Stecker vor, die dem Messgerät nacheinander präsentiert werden. Dabei gibt man dem Messgerät vor, wo jeweils der zu erwartende Wert des s_{11} -Parameters ist. Im Smith-Diagramm liegt der Kurzschluss ganz links beim Punkt ($s_{11} = -1$),

der Leerlauf ganz rechts bei ($s_{11} = 1$) und der Normabschluss im Mittelpunkt ($s_{11} = 0$). Falls das Messgerät etwas anderes misst, kann es so seine Fehlerterme berechnen und dies in die folgenden Messungen mit einbeziehen.

Ein Beispiel

Im folgenden Beispiel wurde ein SAW-Filter untersucht, wie es in GSM-Mobiltelefonen gebraucht wird. Ein SAW-Filter ist ein passives Filter, das ein anliegendes elektrisches Signal in eine Oberflächenakustikwelle wandelt. Mittels mechanischer Strukturen lässt sich diese akustische Welle auf kleinstem Raum bearbeiten, bevor sie wieder in ein elektrisches Signal zurückgewandelt wird. Solche Filter können sehr selektiv gebaut werden und so zwischen den relativ eng zusammen liegenden Bändern im Downlink und im Uplink eines GSM-Systems unterscheiden.

Bild 5 zeigt den Reflexionskoeffizienten s_{11} und den Transmissionskoeffizienten s_{21} des angesprochenen SAW-Filters. Man beachte, dass der Reflexionskoeffizient für Frequenzen im Durchlassbereich klein ist. Für solche Frequenzen liegt s_{11} in der Nähe der Mitte des Smith-Diagramms. Der entsprechende Transmissionskoeffizient befindet sich in diesem Fall nahe bei 0 dB.

Fazit

Die wichtigsten Messgeräte in der HF-Technik sind der Spektrumanalysator zur Vermessung eines Signals und der Netzwerkanalysator zur Vermessung einer Systemkomponente. Während die Handhabung des Spektrumanalysators «nur» sinnvolle Einstellungen der Filterbandbreiten am Gerät bedingt, ist der Gebrauch eines vektoriiellen Netzwerkanalysators etwas komplexer, da jeder Messung in der Regel eine Kalibration vorausgeht, bei der Fehlerterme im Messgerät und in den unmittelbaren Anschlüssen erfasst und kompensiert werden müssen.

Bild 5: s_{11} und s_{21} eines gemessenen SAW-Filters im GSM-Band

