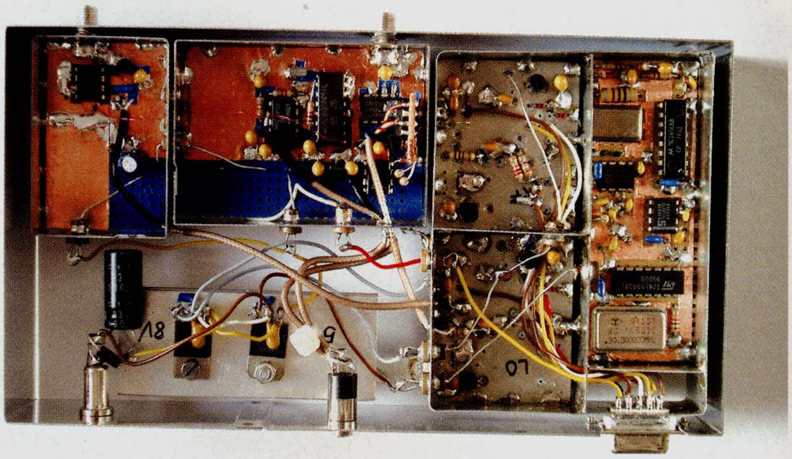
Netzwerkanalyzer selbst gebaut (1)

Vektorieller Netzwerkanalysator mit minimaler Hardware

Prof. Thomas Baier, DG8SAQ

Nach langjährigem beruflichem Umgang mit Vektor-Netzwerkanalysatoren wollte ich im heimischen Hobbykeller auch nicht mehr auf ein solches Gerät verzichten. Den Kauf eines kommerziellen Gerätes empfand ich allerdings als zu teuer (ca. 100 k€) und unsportlich.

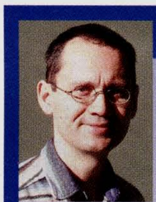


Nachdem ich schon Erfahrung im Bau eines skalaren Netzwerkanalysators [1] gesammelt hatte, lag die Idee zum Eigenbau eines Vektor-Netzwerkanalysators (VNWA) nahe. Eine Suche im Internet ergab, dass es bereits zwei Projekte dieser Art gibt [2, 3]. Nachdem ich sie studiert hatte, kam ich zu dem Schluss: zu kompliziert, zu viel Digitaltechnik, zu viele Spezialbauteile und zu kleiner Frequenzbereich. Das musste auch einfacher und besser gehen. Ich setzte mir das Ziel, einen PC-gesteuerten VNWA mit minimalem Hardwareaufwand zu entwickeln, bei dem der PC so weit als möglich Hardware ersetzen sollte. Bei der Steuerschnittstelle wollte ich statt auf USB auf die alt bewährte Parallelschnittstelle zurückgreifen. Dadurch konnte im VNWA ein USB-Controller entfallen. Die Messdaten sollten gar nicht im VNWA digitalisiert werden, da ja jeder PC auf seiner Soundkarte zwei hervorragende 16-Bit-A/D-Wandler besitzt. Somit entfallen Teile der analogen Signalverarbeitung und der externe A/D-Wandler.

Auf der HF-Seite wollte ich statt eines teuren und bandbegrenzenden Hybridkopplers eine simple Widerstandsbrücke einsetzen und so den nutzbaren Frequenzbereich bis nahezu 0 Hz herunter erweitern. Baluns wurden durch symmetrisch arbeitende Gilbert-Zellen-Mischer realisiert. Ich habe mit meinem Gerät bis herunter zu 200 Hz gemessen! Durch ein trickreiches Frequenzkonzept wollte ich sämtliche Filter einsparen und dabei noch die normalerweise unerwünschten Nebenwellen der verwendeten Direkt Digital Synthese-Oszillatoren nutzbringend verwerten. Damit konnte ich den Frequenzbereich bis ins 70-cm-Band und darüber hinaus erweitern.

Hätte ich allerdings geahnt, welche Softwareprobleme auf mich zukommen, hätte ich das Projekt vielleicht nie begonnen. So steht heute nach einer Woche Lötarbeit und einem Jahr Programmierarbeit ein hervorragend funktionierendes Messsystem zur Verfügung, welches den Vergleich mit kommerziellen Geräten im Basisfrequenzbereich bis 160 MHz nicht zu scheuen braucht.

Zur Person



Prof. Dr. Thomas Baier, DG8SAQ Jahrgang 1962, lehrt seit 2003 Mathematik, Physik und Elektronik an der Fachhochschule Ulm. Zuvor arbeitete er fast zehn Jahre lang an der Entwicklung von SAW-Filtern für den Mobilfunk bei Siemens bzw. EPCOS. Er ist Funkamateur seit etwa dem 18. Lebensjahr.

Besondere Interessen: Eigenbau vom Mikrocontroller bis zur Mikrowellentechnik.

Anschrift:
Hermann-Köhl-Weg 12
89075 Ulm
dg8saq@darc.de

Wozu vektorielle Netzwerkanalyse?

Bei der Netzwerkanalyse möchte man typischerweise die Durchgangsdämpfung eines elektrischen Netzwerkes wie eines ZF-Filters bestimmen. Dazu legt man ein Signal bekannter Frequenz und bekannter Leistung an den Eingang des Netzwerks an und misst die Ausgangsleistung. Die Durchgangsdämpfung ist dann das Verhältnis Ausgangs-/Eingangsleistung. Benutzt man zusätzlich eine VSWR-Messbrücke, so kann auch die vom Eingang zurückreflektierte Leistung gemessen werden. Die Reflexionsdämpfung ist dabei das Verhältnis reflektierte Leistung/zulaufende Leistung.

Bei der vektoriellen Netzwerkanalyse misst man nicht nur die Leistungsbeträge von reflektiertem und durchgehendem Signal, sondern auch die Phasenverschiebungen der beiden gegenüber dem Eingangssignal. Auf den ersten Blick scheinen die Phasen uninteressant, aber bei genauerer Betrachtung können aus den Phasen viele wichtige Informationen gezogen werden.

Beispiel: Sowohl ein kurzgeschlossenes als auch ein offenes Leitungsende reflektieren 100 % der einlaufenden Leistung. In beiden Fällen ist die Reflexionsdämpfung also 1. Man kann somit

mit der Reflexionsdämpfung allein nicht zwischen Kurzschluss und offenem Leitungsende unterscheiden.
Nimmt man die Phaseninformation dazu, so gelingt die Unterscheidung ohne weiteres: Ein offenes Leitungsende reflektiert ohne Phasenverschiebung, ein Kurzschluss reflektiert mit 180° Phasenverschiebung.
Aus der Reflexionsdämpfung zusammen mit der Phasenverschiebung kann man sogar die genaue Eingangsimpedanz des Netzwerkes berechnen, aus welcher man wiederum ein Anpassnetzwerk zur Leistungsanpassung berechnen kann. Eine typische Anwendung wäre z.B. die Leistungsanpassung des 50-Ω-Ausgangs eines Senders an eine Sendeantenne.
Eine andere Anwendung wäre die Vermessung eines unbekannten Kondensators oder einer Spule. Dabei erhält man nicht nur die Kapazität bzw. Induktivität, sondern auch die elektrische Güte des Bauelements.
Vermisst man bei einem elektrischen Zweitor (z.B. einem Quarzfilter) sämtliche Reflexionsdämpfungen und Transmissionsdämpfungen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung und die zugehörigen Phasen, dann kann man diese Messungen zur Simulation des Zweitores in einer beliebigen elektrischen Schaltungsumgebung auf dem Computer benutzen, z.B. mit den Simulationsprogrammen APLAC oder ADS [4, 5]. Die Schaltungsumgebung kann dabei rechnerisch optimiert werden.

Grundlagen

Komplexe Zahlen

In der vektoriellen Netzwerkanalyse wie auch in der digitalen Signalverarbeitung nutzt man aus, dass elektrische Signale mittels komplexer Zahlen dargestellt werden können.
Die reellen Zahlen, mit welchen wir täglich umgehen, sind aus mathematischer Sicht die Zahl 1 und beliebige Vielfache davon. Beispiele:
$2 = 2 \cdot 1; 7 = 7 \cdot 1;$
$-3 = -3 \cdot 1; 0 = 0 \cdot 1;$
$\pi = \pi \cdot 1 = 3{,}14159\ldots$
Man kann die reellen Zahlen, wie in **Bild 1a** gezeigt, auf einem Zahlenstrahl darstellen. Man kann sie sich dort der Größe nach sortiert wie auf einer Perlenschnur aufgereiht vorstellen.
Quadriert man eine beliebige reelle Zahl, d.h., multipliziert man sie mit sich selbst, so erhält man als Ergebnis immer eine nicht negative reelle Zahl. Die Umkehrung dieses Quadrierens ist das Quadratwurzelziehen. So ergibt z.B. Quadratwurzel aus 9 = 3, weil 3 · 3 = 9 ergibt. Nun gibt es aber offenbar keine reelle Zahl, welche mit sich selbst multipliziert eine negative Zahl, z.B. –1 ergibt. Allein mit den reellen Zahlen kann man die Quadratwurzel aus –1 also nicht berechnen. Diesen Umstand empfand der Mathematiker Leonhard Euler [6] vor fast 300 Jahren als so unbefriedigend, dass er eine neue Art von Zahlen einführte, die komplexen Zahlen.
Er erklärte kurzerhand die Quadratwurzel aus –1 zur Einheit i (in der Elektrotechnik auch oft j genannt) einer neuen Kategorie von Zahlen, den imaginären Zahlen. D.h., man erhält alle imaginären Zahlen, indem man

$$i = \sqrt{-1}$$

mit beliebigen reellen Zahlen multipliziert. Damit kann man problemlos die Wurzeln aus beliebigen negativen Zahlen ziehen, z.B. ergibt

$$\sqrt{-16} = \sqrt{16 \cdot (-1)} =$$
$$\sqrt{16} \cdot \sqrt{-1} = 4 \cdot i = 4i$$

Ähnlich wie die reellen Zahlen kann man die imaginären Zahlen auf einem Zahlenstrahl darstellen, siehe **Bild 1b**. Die reellen und imaginären Zahlen kann man durch Addition zu den komplexen Zahlen, d.h., zusammengesetzten Zahlen kombinieren, so ist z.B. 3 + 4 i eine aus der reellen Zahl 3 und der imaginären Zahl 4 i zusammengesetzte komplexe Zahl. Dabei nennt man 3 den Realteil und 4 den Imaginärteil der komplexen Zahl 3 + 4 i.
Mit komplexen Zahlen rechnet man wie mit reellen Zahlen, lediglich bei der Multiplikation muss man berücksichtigen, dass $i \cdot i = -1$ ergibt. Beispiel:
$(3 + 4i) \cdot (6 - i) = 3 \cdot (6 - i) + 4i \cdot (6 - i)$
$= 18 - 3i + 24i - 4i^2 = 18 + 21i + 4$
$22 + 21i$
Die Zahl Null ist gleichzeitig reell und imaginär, da $0 = 0 \cdot 1 = 0 \cdot i$. Daher kann man die komplexen Zahlen durch zwei sich senkrecht in der Null schneidende Zahlenstrahlen darstellen. Man erhält, wie in **Bild 2** gezeigt, die komplexe Zahlenebene. Jede komplexe Zahl $z = x + i\,y$ findet sich als Punkt in der komplexen Zahlenebene wieder. Statt die Zahl z durch ihren Realteil x und ihren Imaginärteil y anzugeben, kann man sie auch durch ihren Abstand r von der Null und den Winkel φ, welcher der Pfeil von der Null zur Zahl z gegen die x-Achse bildet, festlegen. Der Abstand r heißt dabei der Betrag der Zahl z oder kurz |z|.
Zwischen x, y, r und φ gelten dabei einfache mathematische Beziehungen:

$$r^2 = x^2 + y^2 = (x + iy) \cdot (x - iy) = z \cdot z^*$$
$$\tan\varphi = \frac{y}{x}$$
$$x = r \cdot \cos\varphi$$
$$y = r \cdot \sin\varphi$$

Die nützliche Zahl $z^* = x - iy$ heißt die zu $z = x + iy$ konjugiert komplexe Zahl.
Die wichtigste Gleichung für die Signaltheorie ist die Eulersche Gleichung:

$$\cos\varphi + i \cdot \sin\varphi = e^{i\varphi}$$

Sie fasst Sinus und Cosinus zu einer Exponentialfunktion zusammen.
Damit kann jede komplexe Zahl sehr einfach mit Betrag r und Phasenwinkel φ dargestellt werden:

$$z = x + iy = r\cos\varphi + i \cdot r \cdot \sin\varphi$$
$$= r \cdot (\cos\varphi + i \cdot \sin\varphi) = r \cdot e^{i\varphi}$$

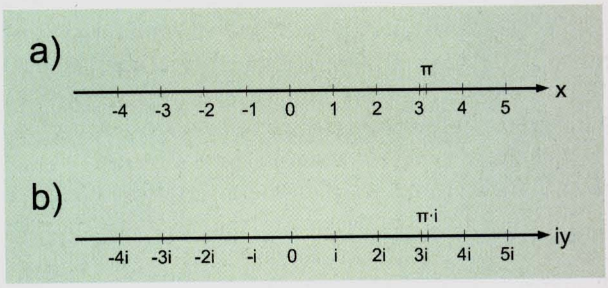


Bild 1: Die reellen Zahlen (a) wie auch die imaginären Zahlen (b) sind wie Perlen auf dem Zahlenstrahl aufgereiht

In dieser Form kann man komplexe Zahlen besonders einfach miteinander multiplizieren oder durcheinander dividieren, weil für die Exponentialfunktion gilt

$$e^{a+b} = e^a \cdot e^b \text{ und } \frac{1}{e^a} = e^{-a}$$

Beispiel:

$$\frac{6 \cdot e^{3i}}{3 \cdot e^{2i}} = \frac{6}{3} e^{3i} \cdot e^{-2i} = 2 \cdot e^{3i-2i} = 2 \cdot e^{i}$$

So schufen Euler und seine Nachfolger die Grundlagen der modernen Signaltheorie.

Komplexe elektrische Signale

Jedes elektrische Signal (zeitlicher Spannungsverlauf) besteht aus einer oder mehreren Sinusschwingungen konstanter Frequenz und Amplitude, das so genannte Frequenzspektrum.
Dieses bestimmt man rechnerisch mittels Fouriertransformation [7] oder experimentell mit einem Spektrumanalyzer. Die Sinusschwingungen bilden dabei gewissermaßen den Baukasten, um beliebige Signale zu synthetisieren (z.B.

beim mp3-Verfahren) oder zu beschreiben.

Eine Sinusschwingung der Frequenz f besitzt immer die Form

$U_f(t) = r \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$.

Die Größe r bezeichnet die Amplitude und φ einen Phasenwinkel, t bezeichnet die Zeit.

$U_f(t)$ ist ein realer physikalischer, z.B. mit einem Oszilloskop messbarer Spannungsverlauf.

Um Berechnungen an elektrischen Schaltungen einfacher durchführen zu können, benutzt man jedoch nicht das reale (und reelle!) Signal $U_f(t)$, sondern erweitert es mit dem imaginären Signal $i \cdot V_f(t) = i \cdot r \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi)$ zum komplexen Signal

$W_f(t) = U_f(t) + i \cdot V_f(t)$.

Mit Hilfe der Eulerschen Gleichung nimmt das komplexe Signal $W_f(t)$ eine besonders einfache Form an:

$$W_f(f) = r \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi) + i \cdot r \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) = r \cdot e^{i(2\pi f \cdot t + \varphi)} = r \cdot e^{i\varphi} \cdot e^{i2\pi f \cdot t}$$

Legt man rein rechnerisch eine solche komplexe Spannung an einen Kondensator, eine Spule oder einen Widerstand an, so errechnet man einen Stromfluss, der ebenfalls komplex ist.

Bildet man das Verhältnis komplexe Spannung/ komplexer Strom, so erhält man die folgenden komplexen frequenzabhängigen Widerstände = die komplexen Impedanzen der Bauteile:

Widerstand: $Z_R = R$ (reell)

Kondensator: $Z_c = \frac{1}{i\omega C} = \frac{-i}{\omega C}$ (negativ imaginär)

Spule: $Z_L = i\omega L$ (positiv imaginär)

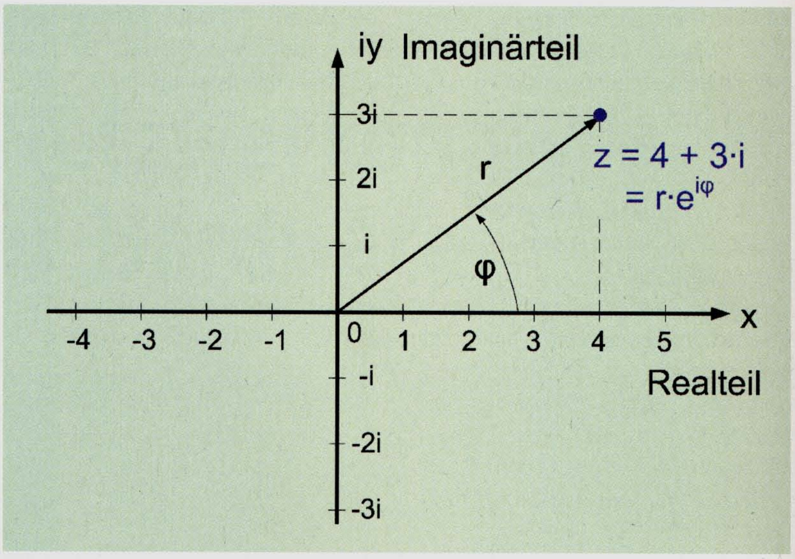


Bild 2: Die Vereinigung der reellen und imaginären Zahlen zur komplexen Zahlenebene

Durch die Benutzung komplexer Spannungen und Ströme kann man Kondensatoren und Spulen wie Widerstände rechnerisch mit dem Ohmschen Gesetz behandeln, allerdings mit komplexen Widerstandswerten.

Genauso kann man ein solches komplexes Signal

$$E_f(t) = r_E \cdot e^{i\varphi_E} \cdot e^{i2\pi f \cdot t}$$

an den Eingang eines elektrischen Zweitores anlegen. Man erhält am Ausgang rechnerisch ebenfalls ein komplexes Signal

$$A_f(t) = r_A \cdot e^{i\varphi_A} \cdot e^{i2\pi f \cdot t}$$

Das Verhältnis von Ausgangsignal zu Eingangssignal hängt von der Frequenz f ab und wird Übertragungsfunktion H(f) des Zweitores genannt:

$$H(f) = \frac{A_f(t)}{E_f(t)} = \frac{r_A}{r_E} e^{i(\varphi_A - \varphi_E)}$$

Dabei ist r_A/r_E der z.B. mit einem Wobbler messbare Dämpfungsverlauf des Zweitores, $\varphi_A - \varphi_E$ ist die messbare Phasenverschiebung zwischen einem sinusförmigen Eingangs- und Ausgangssignal.

(wird fortgesetzt) CQDL

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Thomas Baier, DG8SAQ: „Skalarer Eigenbau-Network-Analyzer…“, CQ DL 9/05–11/05
- [2] TAPR-Vector Networkanalyzer, www.tapr.org/kits_vna.html
- [3] Eigenbau-VNA nach Paul Kiciak, N2PK, http://users.adelphia.net/~n2pk/
- [4] www.aplac.com/
- [5] http://eesof.tm.agilent.com/products/ads_main.html
- [6] Leonhard Euler, 1707–1783, Schweizer Mathematiker und Physiker
- [7] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew: „Taschenbuch der Mathematik“, Thun-Verlag, Frankfurt/Main
- [8] Zinke, Brunswig: „Lehrbuch der Hochfrequenztechnik“, Band 1, Springer-Verlag, 1990.
- [9] Sound Blaster Live! 24-bit, www.soundblaster.com
- [10] www.rz.fh-ulm.de/~baier/sonstiges/Soundblaster/index.shtml
- [11] RTX: www.sybera.com/
- [12] Datenblatt AD9851 von Analog Devices zu finden auf www.analog.com. Danke für die kostenlosen Muster!
- [13] Bernd Kaa, DG4RBF: „KW-Synthesizer von 1–65 MHz mit DDS“, UKW-Berichte 4/99
- [14] Rohde und Schwarz Messbrücke ZRC
- [15] Helmut Bentivoglio, DJØFW, HFB-Elektronik. Anfragen nach Bausätzen bitte per E-Mail an den Autor: dg8saq@darc.de
- [16] Dr. Thomas Baier: „Oberflächenwellen-Filter“, CQ DL 11/97, S. 865ff.

Tipps & Tricks

FT-726R: Spannungsabfall am Relais

Nach vielen Betriebsjahren häufte sich beim Yaesu FT-726R der Effekt, dass Discriminator- sowie S-Meter-Instrument zeitweilig und zunehmend falsche Werte anzeigten.

Die Fehlereingrenzung führte schließlich zum Relais RL 01 auf der Tx-Platine. Am Ruhekontakt trat ein Spannungsabfall von bis zu 4 V auf. An der Rx-Platine J 08, Stift 3 standen deshalb statt 8 V nur noch 4 V zur Verfügung. Dieser Effekt trat auch bei einem anderen OM auf.

Eine Auswechslung des Relais (9-V-Ausführung nicht erhältlich) konnte ich durch Einsprühen der Relaiskontakte mit dem Waffenpflegemittel Ballistol dauerhaft vermeiden.

Bei dieser Gelegenheit sei angemerkt, dass ich Ballistol auch bei Kontaktproblemen an Luftdrehkondensatorschleifkontakten (Kratzgeräusche bzw. Oszillatorausfall) sowie NF-Umschaltern mit dauerhaftem Erfolg einsetzen konnte.

Hermann Schätz, DJ5NI
hermann.schaetz@t-online.de