

Anhang TWOP: Numerische 2-Tor-Signal- und Rauschanalyse

TWOP wurde am Institut für Hochfrequenztechnik der FH Mannheim entwickelt und wird seit 1989 in Forschung, Lehre und Prüfungen routinemäßig eingesetzt. Dieses auf dem Rechner hp 48 und Nachfolgemodellen laufende Programm *TWOP setzt die hergeleitete Theorie praxisgerecht um* und wertet alle wesentlichen Formeln per Knopfdruck aus. Im folgenden werden die Nummern der programmierten Gleichungen und Tabellen mit angegeben.

1. Hauptverzeichnis TWOP: Eingabe, Speicherung und Umwandlung von Vierpolen

Im Hauptverzeichnis werden mit DATx (x unterschiedlich) je nach Situation unterschiedliche Vierpoldaten eingelesen. Die direkte z_{ij} -, y_{ij} - oder s_{ij} -Eingabe erfolgt mit DATZ, DATY oder DATS. Das Transistorersatzbild nach Bild 2.11 liest man mit DATT und die durch Wellenwiderstand Z_w und γL definierte Leitung durch DATL ein. DATO (selten benutzt) nimmt die K-Parameter nach (2.4) auf. Statt K_{12} wird dabei $YR = -y_{12} = K_{12}/K_{22}$ verlangt.

Jede Vierpoldateneingabe muß über DATx ($x = S, Y, Z, L, T, O$) erfolgen. **DATx** nutzt dann die sonst nie benötigten Umwandlungsunterprogramme SZ, SY, ZS und YS und wandelt prinzipiell den eingegebenen Vierpol in z-, y- und s-Form um und **speichert ihn in zueinander passender Form in die s-, z- und y-Speicher**. Diese 12 Speicher heißen im folgenden immer (*Vierpol-)*Arbeitspeicher. Dort darf man die Vierpole **nie direkt einspeichern**.

Die Torimpedanzen $Z_{G,L}$ sind von Hand einzugeben. Der Speicher Z_0 hat ohne jede Ausnahme den Inhalt 50Ω und dient der Umrechnung zwischen Impedanzen und Reflexionsfaktoren entsprechend $\Gamma \leftrightarrow Z$ nach (2.42) und für s-Parameterumwandlungen. **Die Fenster bedeuten:**

Leitung	(2.42)	(2.42)	(2.43)	(2.43)	50 Ω
TRL	Z \rightarrow Γ	$\Gamma \rightarrow$ Z	Γ_{in}	Γ_{out}	Z₀

y-Param.- Eingabe	s-Param.- Eingabe	nur als Unterprogramm genutzt: Umwandlungen nach Tab. 2.3			
DATY	DATS	SZ	SY	ZS	YS

y-Arbeitspeicher				z-Arbeits-	
Y₁₁	Y₁₂	Y₂₁	Y₂₂	Z₁₁	Z₁₂

- hervorgehobener Rahmen = Unterverzeichnisse
- fett gedruckter Text = Rechenprogramme + Dateneingaben
- übrige Fenster = Datenspeicher.

Operat.	Transistor	Leitung	z-Param.-
Torimpedanz	verst.	Tab. 2.4 a	(1.19) Eingabe
Z_G	Z_L	DATO	DATT
		DATL	DATZ

Emitter in Basis/Koll.-sch.		s-Arbeitspeicher			
(2.14)	(2.15)	S₁₁	S₁₂	S₂₁	S₂₂
YE \rightarrow B	YE \rightarrow C				

Vierpol - Rauschkreise + Rausch -		Rauschvierpole		Rausch -	
- Speicher	vernetzung			analyse	
Z₂₁	Z₂₂	CASC	ANOI	BNOI	NOISE

μ -Wellen- Verstärker	(2.16) - (2.23)	Tab. 2.4/7b	10 Vierpolspeicher		
UAMP	AMP	YG	SAVEY	RCL	YI

Das allerletzte Fenster ist der Objektspeicher YIJ mit einer Liste für 10 (Voreinstellung) komplexe y-Parametervierpol-Matrizen. **SAVEY** speichert den aktuellen Arbeitsvierpol aus dem Vierpolarbeitspeicher in y-Form nach YIJ. Der Befehl **RCLY** holt ihn formatrichtig für **DATY** in den Stack. Mit **DATY + CONT** speichert man den Vierpol dann in den Vierpolarbeitspeicher zurück. Bei **SAVEY** und **RCLY** wird noch nach der Platznummer in der Liste gefragt.

Vom aktuellen Vierpol im Vierpolarbeitspeicher bestimmt **AMP** die Verstärkungen, Ein- und Ausgangsimpedanzen, Rückkopplung, Ersatzzweipol etc., **YG** die Transistorersatzbilder und SPICE-Parameter. **UAMP** berechnet K, Stabilitätskreise, G_a - und V_p -Kreise und verallgemeinerte s-Parameter. **CASC** gestattet Parallel-, Serien- oder Kettenschaltung von Vierpolen, und **TRL** berechnet Leitungsdaten formatrichtig für **DATL**. **ANOI** und **BNOI** bestimmen Rauschvierpole aus Rauschkreisen. **NOISE** analysiert rauschende, vernetzte Vierpole.

2. Verzeichnis AMP: Spannungs- und Stromverstärkung, Impedanzen, Ersatzzweipol

Nach Eingabe von $Z_{G,L}$ werden mit dem Befehl **CALC** (= calculate) für den im Vierpolarbeitsspeicher gespeicherten Vierpol alle Gleichungen (2.16) bis (2.23) ausgewertet und die Ergebnisse in Speichern unter den eingeführten Namen abgelegt. Die Generatorspannung $U_G = \underline{U}_G$ benötigt man nur für die LL-Spannung \underline{U}_{2L} . **Beispiele:** Kap. 2.1.11 b).

3. Verzeichnis YG

3.1 Ersatzbildbestimmung des Transistors

Hier wird angenommen, daß im Vierpolarbeitsspeicher die Vierpolparameter eines einzelnen Transistors - und keiner Zusammenschaltung - in Emitterschaltung gespeichert sind.

CBPT (=calculate bipolar transistor) bestimmt das Kleinsignalersatzbild nach Bild 2.11 entsprechend Tabelle 2.4 b) ; **Beispiel:** Kap. 2.2.1 g)

CFET (=calculate FET) bestimmt das Kleinsignalersatzbild nach Bild 2.14 entsprechend Tabelle 2.7 b) ; **Beispiel:** Kap. 2.2.2 d)

Die Ergebnisse werden mit den eingeführten Bezeichnungen in Fenstern abgelegt.

3.2 Unterverzeichnis SPICE: Bestimmung arbeitspunktangepaßter SPICE-Parameter

Hier werden für den im Vierpolarbeitsspeicher gespeicherten Bipolartransistor oder JFET die arbeitspunktangepaßten SPICE-Parameter nach (2.28) und (2.30) berechnet. Zuvor sind im Verzeichnis SPICE noch Arbeitspunktwerte und Frequenz der Vierpolparameter einzugeben:

CALCT SPICE-Parameter für Bipolartransistor oder **CALCF** SPICE-Parameter für JFET. Die Ergebnisse werden unter den eingeführten Bezeichnungen in Fenstern abgelegt.

Der Prozeß läuft automatisch ab: Die notwendige Ersatzbildbestimmung (im Oberverzeichnis) erfolgt im 1. Schritt als Unterprogramm. Daran schließt sich die Extraktion der Parameter entsprechend (2.28) oder (2.30) an. [beachte: **FREQ** = Frequenz bei Bipolartransistor; **FREQ(U)**= Frequenz bei FET]

Beispiel für Bipolartransistor: Kap. 2.2.1 h); **Beispiel** für FET: Kap. 2.2.2 f)

4. Verzeichnis CASC

CASC gestattet eine Vierpolzusammenschaltung nach Kap. 2.1.9. Die Befehle

PARA, SERI oder **KETE**

starten für Parallel-, Serien- oder Kettenschaltung zweier Vierpole den Zusammenschaltungsvorgang. Alle anderen Fenster werden nicht benötigt.

Nach Starten von z.B. „**PARA**“ ist für den 1. Vierpol ein Kennbuchstabe einzugeben mit folgender Bedeutung

S, Y, oder **Z** **DATS, DATY** oder **DATZ** werden gestartet für s,z- y-Eingabe **DATS,Z,Y**

L, O **DATL** (Leitungseingabe) , **DATO** (OP-Eingabe) wird gestartet

T **DATT** wird gestartet zur Transistorersatzbildeingabe

R **RCLY** wird im Prinzip gestartet zum Rückruf eines Vierpols aus **YIJ**

nur **CONT** Vierpol 1 = momentaner Vierpol aus Vierpolarbeitsspeicher

Danach wird nach einer evt. Anschlußklemmenvertauschung (**YE** → **B**, **YE** → **C**) gefragt.

Bei **R** ist nur eine einzige Ziffer, die Vierpolnummer einzugeben. Bei **S, Z, Y** muß man hingegen komplizierte Vierpolparameter, bei **L** Leitungsdaten, bei **T** Ersatzbildwerte usw. eingeben. Das ist oft fehlerbehaftet. Empfehlenswert ist es daher, alle Vierpole zuvor vorzubereiten, in **YIJ** abzulegen und bei der Vernetzung mit **CASC** nur noch mit **R** rückzurufen. Das ist am einfachsten und insgesamt am sichersten. Außerdem bleiben die Vierpole gespeichert.

Der dann entstandene Vierpol liegt im Vierpolarbeitspeicher. Dann wiederholt sich der gesamte Prozeß für den 2. Vierpol. Vierpol 2 kann völlig anders als Vierpol 1 eingegeben werden. Würde man hier bei Abfrage des Kennbuchstabens nur CONT eingeben, hätte man zunächst Vierpol 2 = Vierpol 1, sofern die sich wieder anschließende Anschlußklemmenvertauschung mit CONT übergangen würde.

Intern werden bei PARA und SERI die zwischengespeicherten y- bzw. z-Matrizen addiert und bei KETE die intern erzeugten Kettenmatrizen multipliziert.

Das Ergebnis der Zusammenschaltung wird in den Vierpolarbeitspeicher abgelegt, und der alte Vierpol ist damit überschrieben.

Die Vierpolnumerierung ONOF sollte man so stellen, daß „aus“ angezeigt wird.

Beispiel: Aufg. 1, Kap. 2.1-2.4

5. Verzeichnis TRL

Diese Verzeichnis gestattet die Bestimmung von Wellenwiderstand Z_w und γL aus physikalischen Größen wie Geometrie, Material und Frequenz. Jedes Programm für die nachfolgenden Leitungstypen lädt Z_w und γL formatrichtig in den Stack. Nach dem Wechsel in das Hauptverzeichnis TWOP, kann mit DATL + CONT die Leitung direkt in den Vierpolarbeitspeicher geholt werden. Wellenwiderstand und $\epsilon_{r\text{eff}}$ sind oft noch in Fenstern abgelegt.

Es gilt immer: L= Leitungslänge in m ; ER= ϵ_r von Füllung/Substrat , FREQ=Frequenz in Hz
H= Substrathöhe bei Leitungen auf Platinen
CALC startet die Programme an

5.1 Unterverzeichnisse KOAX und WIRE

Leitungsberechnung für

- Koaxialkabel nach Tabelle 1.1, Fall 1 mit: RI= r_i und RA= r_a
- Draht über ideal leitender Ebene: Tabelle 1.1, Fall 4 mit: H=s/2 und D=d

5.2 Unterverzeichnis MS (Mikrostreifenleitungen)

Dieses Programm berechnet bis ca. 20 GHz recht genau das dispersive Verhalten von Z_w und γL bei Mikrostreifenleitungen nach Bild 1.24 a). Zusätzlich zu den dortigen Bezeichnungen gilt:

T=t = Metalldicke

ZLDY = $Z_w(\omega)$ = (dynamischer) Wellenwiderstand bei eingegebener Frequenz f

ERDY = $\epsilon_{r\text{eff}}(\omega)$ = (dynamischer) $\epsilon_{r\text{eff}}$ -Wert bei eingegebener Frequenz f

Bei der Abfrage nach der Art der Approximation wählt man SUP = „Supercompact“ und entscheidet sich für die hier programmierte Funktionalapproximation der numerischen Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen.

Der Speicher OPEN liefert die Streukapazität, die diese Leitung bei Leerlauf am Ende hätte.

5.3 Unterverzeichnisse CPW2 und CPW3 für Koplantarleitungen

Diese Verzeichnisse berechnen mit den dortigen Bezeichnungen die Koplantarleitungen nach Bild 1.24 b) und c). Zu beachten ist, daß keine Gegenelektrode vorkommt. Diesen nicht betrachteten Fall gibt es auch. Die Berechnung ist nicht dispersiv. Es gilt EREFF = $\epsilon_{r\text{eff}}$ (statisch).

6. Verzeichnisse ANOI und BNOI

a) Unterverzeichnis BNOI

Der Befehl **CALC** wandelt mit (3.59) die Rauschparameter in einen Rauschvierpol um:

In Fenster einspeichern: $GGOS = \Gamma_{Gopt}' = ; FMIN = F_{min}$ und $RN50 = R_n/50 \Omega$

CALC liefert:

$$UR = [d |U_r|^2 / df]^{1/2} \text{ in } V/\sqrt{Hz}$$

$$IR = [d |I_r'|^2 / df]^{1/2} \text{ in } A/\sqrt{Hz} \quad (I_r', \text{ nicht } I_r !)$$

$$YK = Y_k$$

und bei zusätzlicher F-Eingabe aus (3.58) den gewünschten Rauschkreis $F=const.$ mit komplexem Mittelpunktvektor $CFF = C_F$ und Radius $RF = R_F$. Es muß immer $F > F_{min}$ sein. F ist als Zahl einzutasten: In TWOP werden niemals dB-Werte ein- oder ausgegeben.

b) Unterverzeichnis ANOI

Der Befehl **CALC** berechnet aus

$YGOS = Y_{Gopt}'$, $FMIN = F_{min}$ und einem Wertepaar $(F, Y_G = \text{reell})$
dieselben Größen wie in BNOI beschrieben.

Der Kreis $F=const.$ muß die reelle Achse schneiden. Er liefert in der Y_G -Ebene dann zwei Schnittpunkte $Y_{G1,2}$ von denen jeder gewählt werden kann. In Bild 3.16 schneidet ein Kreis erst bei etwas größerer Rauschzahl. Der F-Wert wird für die Rauschvierpolberechnung und gleichzeitig für die Umrechnung des Kreises in die Γ_G -Ebene genutzt.

7. Verzeichnis NOISE

Der Befehl \rightarrow **RPA** wandelt den Rauschvierpol UR,IR,YK in Rauschparameter R_n , Γ_{Gopt}' und F_{min} um. Der Pfad zum Beziehen des gespeicherten Rauschvierpols wird abgefragt. Der Befehl \rightarrow RPA ist die Umkehrung von CALC in BNOI bzw. von (3.59).

a) Unterverzeichnis PNOI

Rauschvierpolberechnung für passive, thermisch rauschende Vierpole aus s-Parametern:

1) Der Befehl **CALCR** berechnet den Rauschvierpol UR, IR, YK direkt aus s/z/y-Parametern im Vierpolarbeitsspeicher. Der Vierpol muß **reziprok** sein (wird geprüft).

2) Der Befehl **CALN** berechnet entsprechend Kap. 3.7.2 aus der Beziehung $F(Z_G)=1/G_a(Z_G)$ indirekt den Rauschvierpol UR, IR, YK. Dazu wird aus den s/z/y-Parametern im Vierpolarbeitsspeicher das maximale $G_a = G_m = 1/F_{min}$ und ein verfügbarer Gewinn $G_a = 1/F$ für reelles Y_G berechnet und mit ANOI der Rauschvierpol bestimmt. Der Vierpol **kann nichtreziprok sein**. Nachteil: Ein alter, in ANOI gespeicherter Rauschvierpol ist anschließend überschrieben.

b) Unterverzeichnis TURN

Die Befehle **NE** \rightarrow **B** und **NE** \rightarrow **C** vertauschen analog zu **YE** \rightarrow **B** und **YE** \rightarrow **C** die Anschlußklemmen bei einem rauschenden Vierpol, dessen s/z/y-Parameter in Emitterschaltung im Vierpolarbeitsspeicher stehen. Beim Start wird gefragt, aus welchem Verzeichnis der Rauschvierpol in Emitterschaltung geholt werden soll (ANOI, BNOI, PNOI usw.). Im Arbeitsspeicher stehen die neuen s/z/y-Parameter und in UR,IR und YK der neue Rauschvierpol.

c) Unterverzeichnis I1I2

Der Rauschvierpol kann ersetzt werden durch zwei nach unten eingeführte Rauschstromquellen I_1 parallel zum Eingang und I_2 parallel zum Ausgang des Vierpols (s_{ij} seien gespeichert). Die Befehle **RVP** \rightarrow **I** und **I** \rightarrow **RVP** rechnen um zwischen UR, IR, YK und

$$I1 = [d |I_1|^2 / df]^{1/2} \quad \text{und} \quad I2 = [d |I_2|^2 / df]^{1/2} \quad \text{Stromspektren}$$

$$GAI = \gamma_i = d [I_1 I_2^*] / df / [I1 \cdot I2] \quad \text{Korrelationsgrad zwischen } I_1 \text{ und } I_2$$

Die jeweiligen Ausgangswerte speichert man zuvor von Hand in die Fenster ein.

d) Unterprogramm KASK

KASK dient der Ketten- oder Parallelschaltung zweier rauschender Vierpole A und B analog zu CASC KETE und PARA. Die Programme CALC in KASK\KET und KASK\PAR berechnen den Gesamttauschvierpol UR, IR und YK, speichern ihn im jeweiligen Verzeichnis ab, bestimmen die s/z/y-Parameter des rauschfreien Gesamtvierpols und überschreiben damit den Vierpolarbeitsspeicher. Die Rauschvierpole zu A und B müssen zuvor von Hand in das Verzeichnis eingespeichert und die beiden Vierpolparametersätze zu A und B im Matrixspeicher YIJ bereitgestellt werden.

Bei der Berechnung rufen die Vernetzungsprogramme für rauschende Vierpole die alten Vernetzungsprogramme aus CASC für rauschfreie Vierpole als Unterprogramme auf. Falls bei einem Vierpol Anschlußklemmen vertauscht werden sollen, bereitet man dessen transformierte s/z/y-Parameter und dessen transformierten Rauschvierpol mit TURN vor, speichert die transformierten y-Parameter mit SAVEY ab und kopiert von Hand den transformierten Rauschvierpol von TURN nach KASK. Bei Abfragen des Vernetzungsprogramms nach eventuellen Drehungen (Anschlußklemmenvertauschung) können dann einfach die Abfragen mit CONT übergangen werden. Bei den Abfragen nach der Art des Vierpols gibt man R (recall) und danach die Nummer im Matrixspeicher ein.

Die Abwicklung ist etwas elementar. Eine kostenlose Alternative ist dazu aber nicht bekannt.

e) Unterprogramm SNR (signal to noise ratio)

Der Befehl **CALC1** berechnet aus dem beigezogenem Rauschvierpol und ZG in TWOP:

$$FZG = F(Z_G) = \text{Rauschzahl nach (3.43)}$$

und mit zusätzlichem $DELf = \Delta f$:

$$\begin{aligned} URV &= [(d|\underline{U}_{rV}|^2/df) \Delta f]^{1/2} && \text{äquivalentes Vierpolrauschen nach (3.39) innerhalb } \Delta f \text{ in Volt} \\ URG &= [(d|\underline{U}_{rG}|^2/df) \Delta f]^{1/2} && \text{Generatorrauschspannung nach (3.40) innerhalb } \Delta f \text{ in Volt} \\ SN &= S/N_{mit} && \text{Störabstand nach (3.41) für die Signalspannung } \underline{U}_G \\ &&& \text{gegenüber dem in } \Delta f \text{ einfallenden Rauschen;} \\ &&& \underline{U}_G \text{ muß im Verzeichnis AMP abgespeichert werden} \end{aligned}$$

Befehl **CALC2** berechnet alle Größen (außer FZG) *ohne* Rauschvierpol, wenn zuvor die zu ZG gehörende Rauschzahl $F(Z_G)$ in das Fenster FZG von Hand eingespeichert wurde. Beim Aufruf von CALC1 und anschließend CALC2 bestätigt der letzte Befehl nur die alten Werte.

Alle Programme dieses Abschnitts 6 in diesem Anhang ebenso wie die Programme im folgenden Abschnitt 7 sind Gegenstand von Kap. 4 (Rauschen) *im Band 2*, werden aber hier der Vollständigkeit halber schon angegeben.

8. Verzeichnis UAMP

Dieses Verzeichnis dient

- zur Berechnung der verallgemeinerten s-Parameter für allgemeine Vierpole und
- in den Unterverzeichnissen GADS und VPDS zur Dimensionierung der Torimpedanzen Z_G und Z_L bei Mikrowellenschmalbandverstärkern

CALC berechnet aus den s_{ij} im Arbeitsspeicher mit (2.40) bzw. (2.45) den Stabilitätsfaktor K , $\Delta = s_{11}s_{22} - s_{12}s_{21}$ und die Stabilitätskreise (2.44)

SCAT berechnet aus den s_{ij} im Arbeitsspeicher und den gespeicherten Torimpedanzen $Z_{G,L}$ die verallgemeinerten Streuparameter $s_{11G} = S_{11G} \dots s_{22G} = S_{22G}$ nach (2.54) bis (2.56).

a) Unterverzeichnis GADS

Entwurf der Generatorimpedanz Z_G über den verfügbaren Gewinn $G_a(Z_G)$:

CALC berechnet nach (4.15) für das zuvor einzuspeichernde $GREL = g_{rel}^a = G_a / G_m$ den Gewinnkreis $G_a = \text{const}$ in der Γ_G -Ebene mit Mittelpunkt $CA = C_a$, Radius $RA = R_a$ und verfügbarem Gewinn $GA = G_a$; $GREL = 1$ liefert: $G_a = G_m$; $R_a \approx 0$; $C_a = \Gamma_{Gopt}$ nach (4.16) oder (4.11); falls $K < 1$ sein sollte, wird der G_a -Wert direkt abgefragt

b) Unterverzeichnis VPDS

Entwurf der Lastimpedanz Z_L über die Leistungsverstärkung $V_p(Z_L)$:

CALC berechnet nach (4.13) für das zuvor einzuspeichernde $GREL = g_{rel}^v = V_p / G_m$ den Verstärkungskreis $V_p = \text{const}$ in der Γ_L -Ebene mit Mittelpunkt $CP = C_p$, Radius $RP = R_p$ und Leistungsverstärkung $VP = V_p$; $GREL = 1$ liefert: $V_p = G_m$; $R_p \approx 0$; $C_p = \Gamma_{Lopt}$ nach (4.14) oder (4.11); falls $K < 1$ sein sollte, wird der V_p -Wert direkt abgefragt.

Beispiel: beidseitige, konjugiert komplexe Anpassung:

<i>Entwurf mit VP:</i>		<i>Entwurf mit GA:</i>	
VPDS	GREL=1 setzen	GADS	GREL=1 setzen
CALC	liefert: $G_m = VP$; $\Gamma_{Lopt} = CP$	CALC	liefert: $G_m = GA$; $\Gamma_{Gopt} = CA$
TWOP	$GA \rightarrow Z$ liefert Z_{Lopt} , abspeichern in ZL	TWOP	$GA \rightarrow Z$ liefert Z_{Gopt} , abspeichern in ZG
GAIN	liefert Γ_{in}	GOUT	liefert Γ_{out}
$GA \rightarrow Z$	und nach Umwandlung Z_{in}	$GA \rightarrow Z$	und nach Umwandlung Z_{out}
CONJ	liefert $Z_{Gopt} = Z_{in}^*$	CONJ	liefert $Z_{Lopt} = Z_{out}^*$

Beide Wege liefern dieselben optimalen Torimpedanzen $Z_{G,Lopt}$ und dasselbe G_m . Ein praktischer Entwurf der Torimpedanzen unter GADS befindet sich in Kap. 4.1.6 b). Dabei wird unter Berücksichtigung des Rauschens $G < G_m$ gewählt.

Die Rauschkreise für den Mikrowellenschmalband-Vorverstärker liefert z.B. das Verzeichnis BNOI oder ANOI, je nach Art der Datenvorgabe.

Den Störabstand für den dimensionierten Verstärker liefert das Verzeichnis NOISE\SNR.