



Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași

Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

CIRCUITE INTEGRATE MONOLITICE DE MICROUND

Curs 3

Ș.L. dr. ing. Iov J. Cătălin

Noțiuni fundamentale

- Parametrii S
- Adaptarea de impedanță și reflexii
- Câștig, zgomot, stabilitate
- Analiză termică și neliniară

Parametrii S

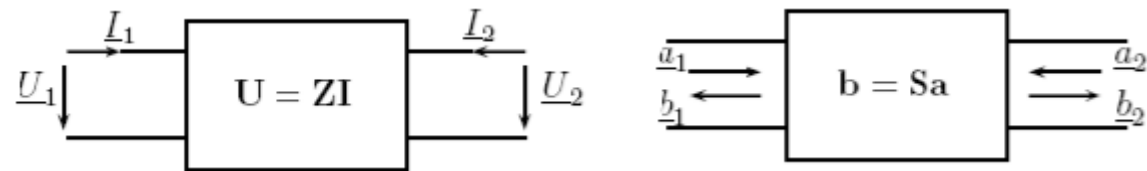
- parametrii de împrăștiere
- caracterizează un circuit la frecvențe înalte

Parametrii S

- puteri și unde electromagnetice (unde incidente și reflectate)
 - la frecvențe de ordinul GHz, liniile de transmisie au lungimi comparabile cu lungimea de undă;
 - efectele de reflexie, impedanță și adaptare devin dominante;
 - este greu de măsurat direct tensiuni și curenți

Parametrii S

- 2 porturi (cel mai frecvent în MMIC-uri):
 - s_{11} - coeficient de reflexie la intrare
 - s_{21} - câștig de transmisie directă
 - s_{12} - câștig invers (izolare inversă)
 - s_{22} - coeficient de reflexie la ieșire



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

$$b_i = \sum_{j=1}^n s_{ij} a_j$$

Parametrii S

- determinarea adaptării de impedanță la intrare/ieșire;
- măsurarea câștigului de putere ($|S_{21}|^2$);
- evaluarea stabilității (prin criterii de stabilitate bazate pe S);
- caracterizarea izolării între porturi (S_{12});
- simularea precisă cu diverse soluții software pentru simulări

Parametrii S

se măsoară cu un VNA (Vector Network Analyzer):

- VNA aplică o undă incidentă și măsoară undele reflectate/transmise;
- se determină amplitudinea și faza pentru fiecare s_{ij}
- rezultatele se afișează de obicei în dB și grade sau ca diagrame Smith

Adaptarea de impedanță și reflexii

- sunt esențiale în proiectarea CIMM (la frecvențe GHz, o nepotrivire mică de impedanță produce pierderi semnificative, reflexii, instabilități și distorsiuni)
- adaptarea de impedanță înseamnă realizarea unei potriviri între impedanța de ieșire a unei surse/etaj și impedanța de intrare a sarcinii/următorului etaj ($Z_{in} = Z_{out}^*$)

Adaptarea de impedanță și reflexii

- impedanța caracteristică (Z_0)
 - este impedanța liniei de transmisie (ex. microstrip, coplanar, stripline).
 - de obicei se alege $Z_0 = 50 \Omega$ pentru compatibilitate cu instrumentele de măsură și alte etaje RF.

Adaptarea de impedanță și reflexii

- Coeficientul de reflexie (Γ)

- Z_L = impedanța sarcinii,
- Z_0 = impedanța liniei.
- Puterea reflectată

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$|\Gamma|^2 = \frac{P_{reflexată}}{P_{incidentă}}$$

Adaptarea de impedanță și reflexii

- $\Gamma = 0 \rightarrow$ adaptare perfectă, fără reflexii
- CIMM - impedanțele se adaptează pe cip, adică în cadrul aceleiași structuri semiconductoare, fără componente discrete

Adaptarea de impedanță și reflexii

- rețele pasive de adaptare
 - linii de transmisie scurte (microstrip sau coplanare),
 - inductanțe și capacități parazite controlate,
 - transformatoare $\lambda/4$,
 - rețele LC echivalente

Adaptarea de impedanță și reflexii

- elemente reactive integrate
 - se desenează pe cip trasee spiralate (pentru L) și benzi interdigitale (pentru C)
 - prin combinarea lor → rețele de tip:
 - L-network (serie + paralel)
 - Π -network
 - T-network

Adaptarea de impedanță și reflexii

- „ $\lambda/4$ transformer” = transformator de lungime $\lambda/4$
- o linie de transmisie (microstrip, coplanară, coaxială etc.) de lungime egală cu o pătrime de lungime de undă electrică ($\lambda/4$) poate transforma impedanța de la un capăt în alta, conform relației:
 - Z_{in} = impedanța văzută la intrarea liniei,
 - Z_0 = impedanța caracteristică a liniei ($\lambda/4$ transformer),
 - Z_L = impedanța sarcinii (load)

Adaptarea de impedanță și reflexii

- λ (lambda) = lungimea de undă a semnalului în mediu $Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$
 - v_p = viteza de propagare
 - c = viteza luminii
 - ϵ_{eff} este permitivitatea efectivă a substratului)

$$v_p = c / \sqrt{\epsilon_{eff}}$$

$$\lambda = \frac{v_p}{f}$$

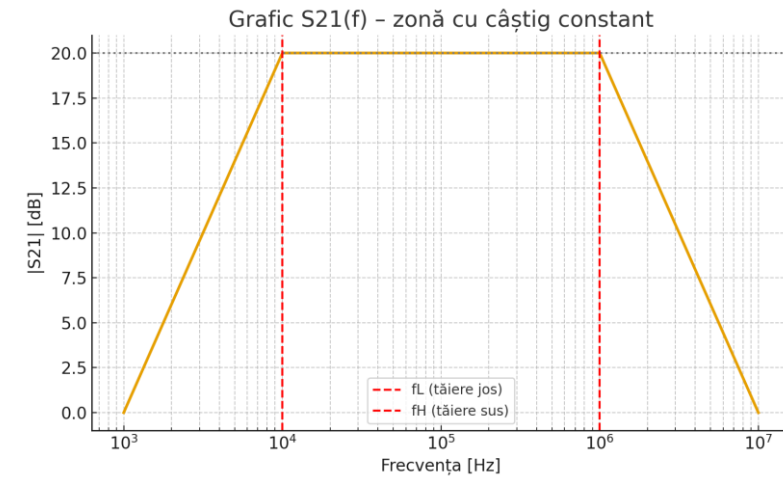
Adaptarea de impedanță și reflexii

- reflexiile - la joncțiunea între două etaje impedanțele nu coincid perfect

	Descriere	Interpretare
S_{11}	Coeficient de reflexie la intrare	Măsoară cât din semnal se reflectă înapoi spre sursă
S_{22}	Coeficient de reflexie la ieșire	Reflexii spre sarcină
S_{21}	Câștig direct (de transmisie)	Măsoară transferul de putere înainte
S_{12}	Câștig invers	Folosit pentru analiză de stabilitate

- $|S_{11}| < -10 \text{ dB} \Rightarrow$ adaptare acceptabilă
- $|S_{11}| < -20 \text{ dB} \Rightarrow$ adaptare foarte bună

Câștigul



- raportul dintre puterea de ieșire și cea de intrare a unui circuit:

- $G = P_{out}/P_{in}$

- de obicei exprimat în decibeli (dB): $G_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$

- CIMM - arată cât amplifică semnalul circuitul pe o anumită frecvență

Câștigul

	Semnificație	Notă practică
Câștig de putere (Power Gain)	raportul puterilor între ieșire și intrare	folosit frecvent în amplificatoare
Câștig de tensiune (Voltage Gain)	raportul tensiunilor (V_{out}/V_{in})	util în circuite cu impedanțe fixe
Câștig de transmisie S_{21}	derivat direct din parametrii S	cel mai uzual în analiza RF

- câștigul mare → bun pentru amplificare de semnal slab
- câștigul prea mare → risc de oscilații nedorite
- se optimizează prin alegerea tranzistorului, polarizare, rețea de adaptare, topologie

Zgomotul

- componentele nedorite în interiorul circuitului, peste semnalul util
- inevitabil la orice temperatură > 0 K
- factorul de zgomot $NF = \frac{(S/N)_{intrare}}{(S/N)_{ieșire}}$ $NF_{dB} = 10 \log_{10}(NF)$
- NF mic = circuitul introduce puțin zgomot propriu, foarte important la amplificatoarele de joasă putere (LNA – Low Noise Amplifiers)

Zgomotul

exemple CIMM	NF tipic	Observații
Amplificator LNA GaAs	0.8 – 2 dB	excelent pentru receptoare
Amplificator GaN de putere	2 – 4 dB	zgomot mai mare, dar putere mare
Mixer activ	6 – 10 dB	adaugă zgomot considerabil

- într-un lanț de amplificare, primul etaj (LNA) dictează zgomotul total;
- materialul semiconductor (GaAs, GaN, SiGe) influențează zgomotul;
- polarizarea și impedanța de intrare corectă reduc NF

Stabilitatea

- capacitatea unui circuit de microunde de a nu intra în oscilație spontană, indiferent de impedanțele de sarcină sau de intrare
- criterii de stabilitate:

- criteriul Rollet (K-Factor)

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

Stabilitatea

- instabilitate – CIMM poate oscila spontan (autooscilații)
 - adăugarea de rezistențe paralele/serii pentru atenuare;
 - modificarea rețelelor de adaptare;
 - utilizarea feedback-ului negativ;
 - controlul polarizării tranzistorului.

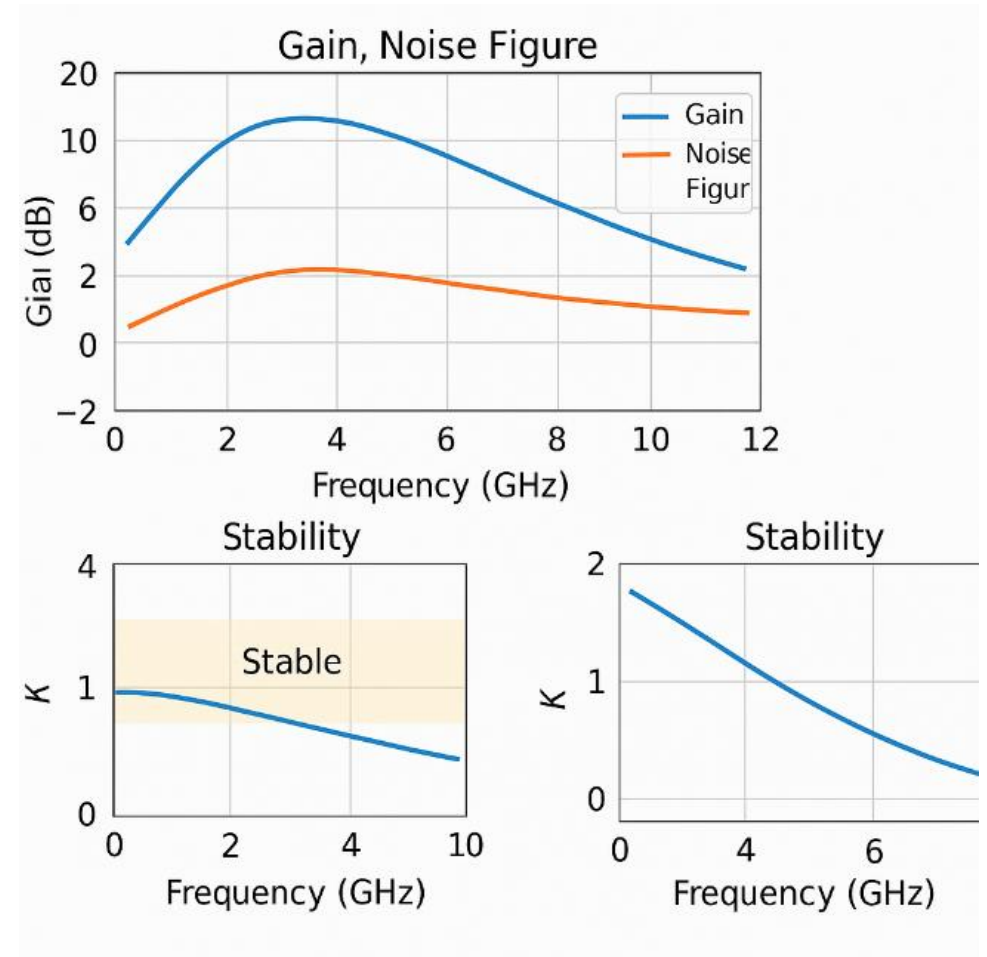
câștig vs. zgomot vs. stabilitate

Parametru	Dacă îl crești...	Efect asupra celorlalți
Câștig	→	crește riscul de instabilitate, crește zgomotul
Reduci zgomotul	→	poate scădea câștigul
Crești stabilitatea (prin rezistențe)	→	scade câștigul, dar crește siguranța

proiectarea este un compromis între câștig, zgomot și stabilitate

În practică

- Într-un fișier S (ex. *.s2p):
 - S_{21} determină câștigul;
 - zgomotul este specificat separat ca $NF(f)$;
 - stabilitatea se analizează prin K și Δ ;
 - în simulatoare RF (ADS, AWR, HFSS) se pot trasa direct hărți de stabilitate, câștig de putere, curbe NF vs frecvență etc



Analiză termică și neliniară

- CIMM - integral pe substraturi semiconductoare (de tip GaAs, InP, GaN, SiGe, sau CMOS RF)
- toate componentele active și pasive se află pe același cip

Analiză termică și neliniară

- la GHz–THz, efectele neliniare și termice devin critice și definesc stabilitatea, eficiența și fiabilitatea circuitului
- analiza termică studiază modul în care energia disipată sub formă de căldură influențează parametrii electrici ai circuitului
- densitatea mare de putere pe suprafață mică duce la autoîncălzire și la apariția neomogenităților termice locale

Analiză termică și neliniară

- parametri implicați:
 - rezistența termică $R_{th} = \Delta T / P_{diss}$
 - capacitatea termică C_{th} - influențează răspunsul tranzitoriu termic
 - conductivitatea termică a substratului (GaAs ≈ 46 W/mK, GaN $\approx 130\text{--}200$ W/mK, Si ≈ 150 W/mK)
 - temperatura de joncțiune $T_j = T_a + P_{diss} \cdot R_{th}$

Analiză termică și neliniară

- efecte termice:
 - scăderea mobilității purtătorilor → reducerea transconductanței
 - creșterea curentului de saturație → neliniaritate suplimentară
 - deriva punctului de polarizare → instabilitate termică (thermal runaway)
 - variabilitatea parametrilor S în funcție de temperatură

Analiză termică și neliniară

- Orice componentă activă (FET, HEMT, HBT) are o caracteristică curent-tensiune neliniară, care generează armonici, distorsiuni și intermodulații

Analiză termică și neliniară

- neliniaritățile sunt esențiale pentru:
 - amplificatoare de putere (PA)
 - mixere și multiplicatoare de frecvență
 - detectoare și limitatoare

Analiză termică și neliniară

- metode moderne de analiză și reducere a efectelor
 - design termic optim (layout cu trasee de disipare, substraturi cu conductivitate ridicată)
 - treceri termice și disipatoare termice
 - feedback termic activ în polarizare
 - simulări termice 3D + HB neliniar cuplate
 - compensare termică în bias network
 - modele compacte cu parametri dependenți de temperatură