Curs 11
Regeneratorul digital. Jitterul în sistemele de transmisii telefonice digitale.

Zsolt Polgar

Communications Department
Faculty of Electronics and Telecommunications,
Technical University of Cluj-Napoca

Conţinutul cursului

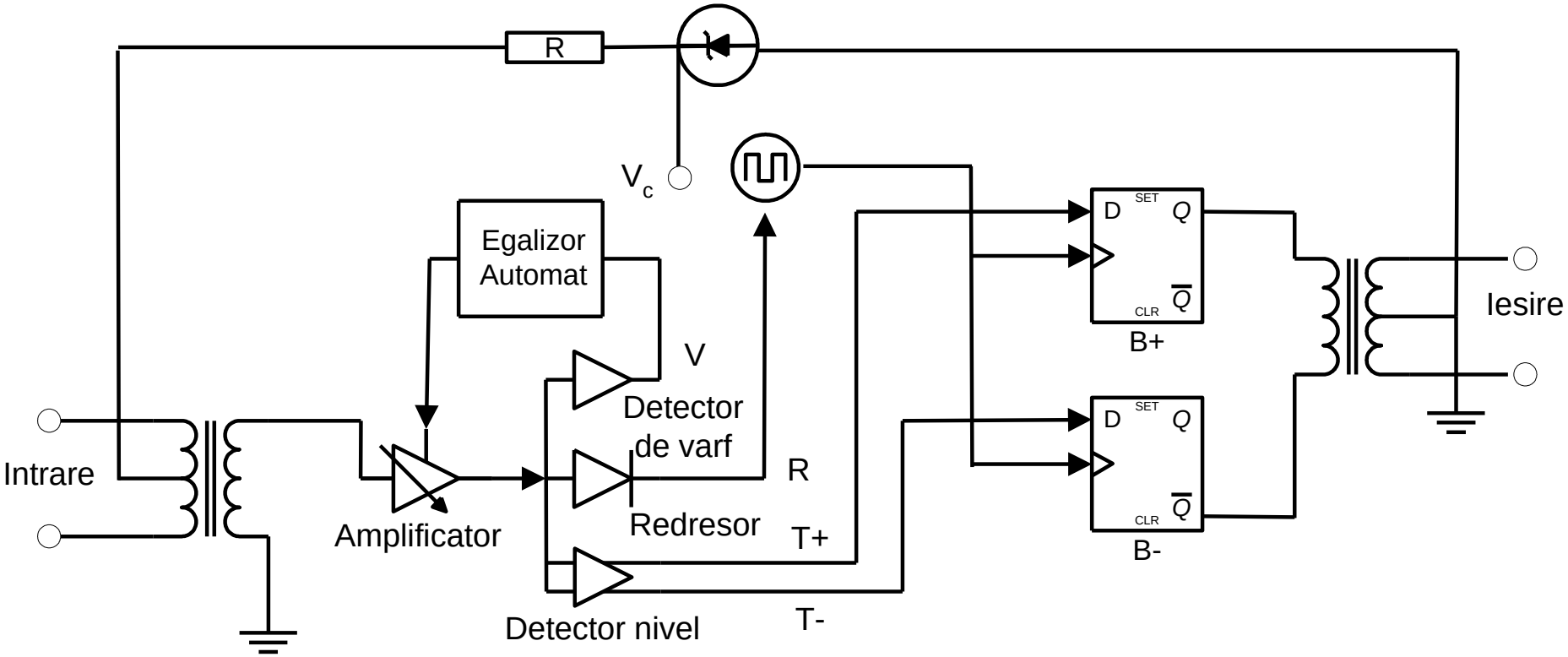
- Regeneratorul digital;
  - Caracteristici / rol;
  - Schemă bloc;
  - Recuperarea tactului de bit.
- Jitterul în sisteme de transmisii digitale;
  - Definire / caracteristici;
  - Originea jitterului;
  - Acumularea / compensarea jitterului;
  - Performanţe de jitter.

Regeneratorul digital

- Regeneratorul: releu de retransmisie, care realizează următoarele operaţii:
  - Extrage din semnalul de linie recepţionat biţii de informaţie;
  - Recodează aceşti biţi;
  - Transmite mai departe semnalul recodat.
- Rolul regeneratorului într-un sistem digital:
  - Reducerea efectului distorsiunilor şi a zgomotelor introduse de canal;
    - nivelul distrosiunilor liniare şi neliniare şi a zgomotelor introduse de un canal creşte proporţional cu lungimea mediului de transmisie;
    - nivelul semnalului transmis scade de asemenea proporţional cu lungimea canalului, datorită atenuărilor;
      - utilizarea unor regeneratoare din loc în loc pe parcursul canalului (al liniei de transmisie) asigură posibilitatea transmisiilor cu debite ridicate pe canale de lungime mare, în condiţii impuse de probabilitate de eroare pe bit;
      - etajul de intrare al unui multiplexor este tot un regenerator.

Regeneratorul digital

- Schema bloc a unui regenerator utilizat în transmisii codate AMI pe fire torsadate;



Regeratorul digital

- Blocurile componente ale tipului de regenerator considerat;
  - Circuite liniare de intrare cu următoarele funcţii:
    - conectare la linie;
    - filtrare semnal recepţionat pentru reducerea zgomotului;
    - amplificare semnal recepţionat până la un nivel constant;
    - egalizare semnal recepţionat pentru reducerea distorsiunilor introduse de canal.
  - Circuite liniare de ieşire cu următoarele funcţii:
    - conectare la linie;
    - amplificare semnal transmis până la un nivel constant impus.
  - Circuite de decizie şi regenerare:
    - regenerează impusurile recepţionate de pe canal;
      - se compară semnalul recepţionat egalizat cu praguri de referinţă în momente când amplitudinea semnalului este maximă;
    - transmite impulsurile regenerate etajului de ieşire;
      - nu se realizează decodarea semnalului; se regenerează impulsurile de cod de pe linie.

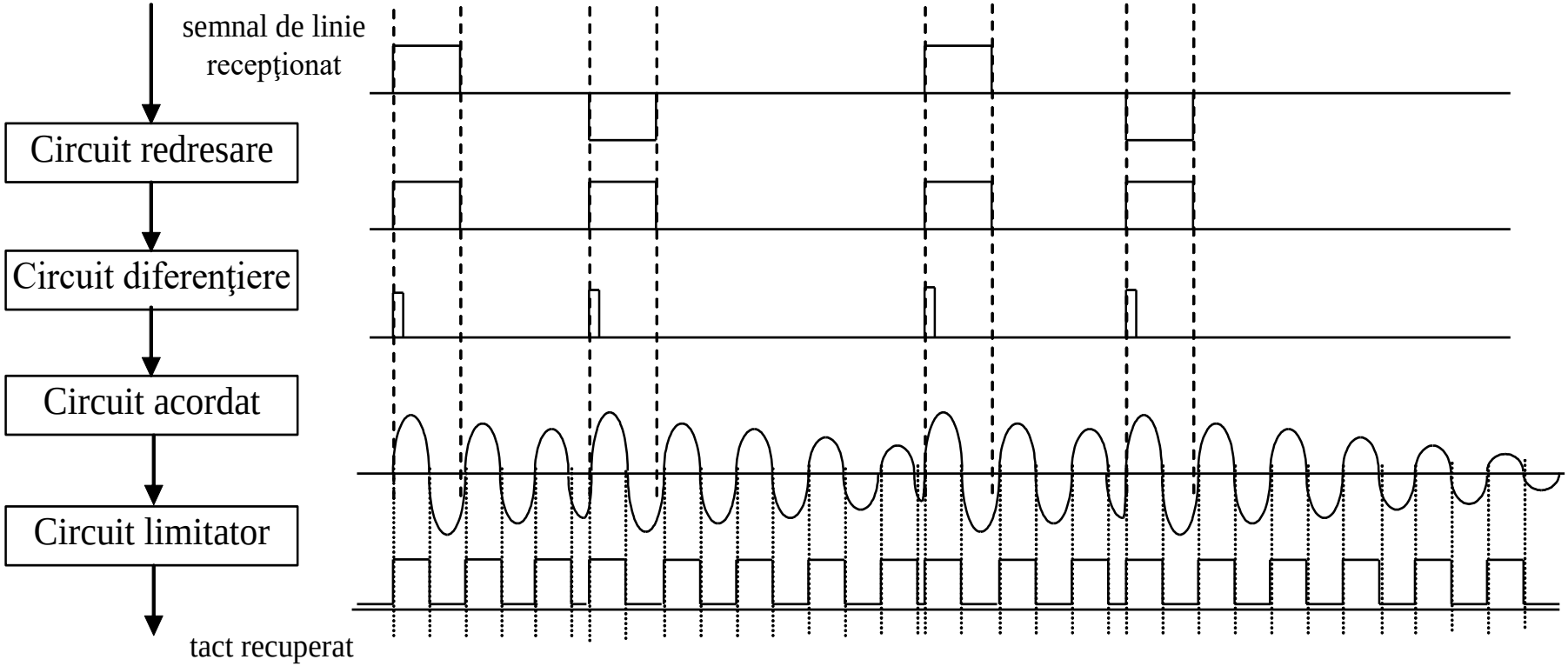
Regeneratorul digital

- Circuite de recuperare a tactului:
  - recuperează tactul din semnalul de linie;
  - se utilizează acest tact pentru citirea impulsurilor recepţionate de pe linie şi pentru formarea unor impulsuri de lăţime standard.
- Circuite auxiliare:
  - telealimentare;
  - localizare deranjamente;
  - protecţie la supracurenţi şi supratensiuni.

- Funcţionarea regeneratorului:
  - impulsurile redresate sunt aplicate circuitului de recuperare al tactului;
  - valoarea de vârf a impulsurilor comandă egalizorul automat şi preamplificatorul de intrare;
  - semnalul de intrare egalizat este comparat cu două praguri la momente de timp date de fronturile tactului recuperat;
  - valorile logice obţinute în urma acestei sondări sunt memorate în bistabilele B+ şi B- şi se aplică etajului de ieşire.

Recuperarea tactului

- O structură simplă de circuit de recuperare al tactului de bit este aşa numitul filtru de tact:
  - Schema bloc şi diagrama de semnale corespunzătoare funcţionării:



Regenerarea tactului

- Functionarea filtrului de tact:
  - impulsurile recepţionate obţinute după egalizor şi amplificator sunt redresate şi apoi diferenţiate:
    - se obţin impulsuri de aceeaşi polaritate care marchează fronturile (trecerile prin zero) ale semnalului recepţionat;
    - frecvenţa şi faza acestor impulsuri este identică cu frecvenţa şi faza medie a tactului de la emisie.
  - Impulsurile generate se aplică unui circuit acordat care oscilează pe frecvenţa tactului local; semnalul generat de acest circuit este apoi limitat;
    - circuitul oscilant este un filtru trece bandă îngust care extrage fundamentala impulsurilor obţinute după circuitul de diferenţiere.
    - în urma limitatorului se obţine tactul local recuperat.
  - semnalul generat de circuitul acordat se amortizează între două impulsuri consecutiv;
    - amortizarea este cu atât mai accentuată cu cât această distanţă este mai mare.
  - frecvenţa semnalului generat de către circuitul acordat nu este chiar identică cu frecvenţa tactului de emisie;
    - nu sunt generate impulsuri la fiecare margine de bit, din cauza nivelelor de zero volţi din cazul semnalului AMI.

Recuperarea tactului

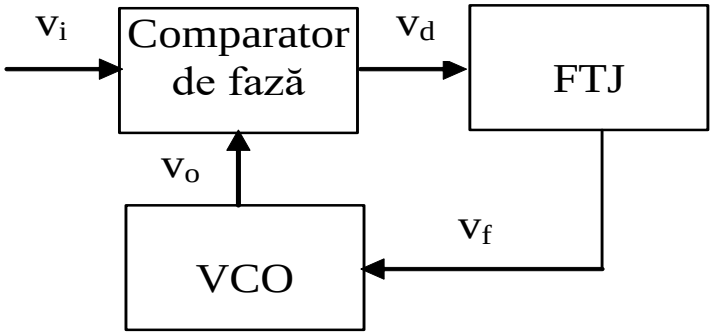
- frecvenţa de oscilaţie liberă a circuitului acordat nu este identică (exact) cu cea a tactului de emisie;
  - apar în plus salturi de fază (întreruperi) în semnalul generat de acest circuit în fiecare moment de generare a impulsurilor.
- Filtrul de tact este un circuit de recuperare a tactului local relativ simplu, dar are performanţe destul de reduse în ceea ce priveşte precizia frecvenţei şi a fazei tactului recuperat.
- Circuitul se poate utiliza în echipamente de transmisie de tip bandă de bază cu două sau trei nivele în linie, echipamente utilizate în sistemele de transmisie telefonice digitale;
  - în cazul acestor sisteme se impun condiţii mai puţin restrictive tactului recuperat (datorită numărului redus de nivele pe linie).
- Funcţia de transfer în fază între intrarea şi ieşirea circuitului:

$$C(s) = \frac{1}{1 + s / B}$$

  - $s=j\omega$, $B=\omega_0/2Q$ este jumătatea lărgimii de bandă a filtrului de extragere a tactului.

Recuperarea tactului

- Îmbunătăţirea performanţelor filtrului de tact se poate realiza prin aplicarea semnalului generat de limitator unui circuit PLL;
  - circuitul PLL reduce semnificativ variaţiile de frecvenţă şi de fază pe care le prezintă semnalul obţinut după limitator sau circuitul acordat.
- Schema bloc de principiu circuitului PLL (“Phase Locked Loop”)



- Funcţionare:
  - comparatorul de fază compară faza semnalului recepţionat şi al celui generat local şi generează o tensiune de comandă a oscilatorului local comandat,
  - tensiunea de comandă este filtrată de către un filtru trece jos pentru eliminarea componentelor de frecvenţă ridicată;
  - comparatorul de fază este un simplu circuit de multiplicare în cazul unei implementări analogice.

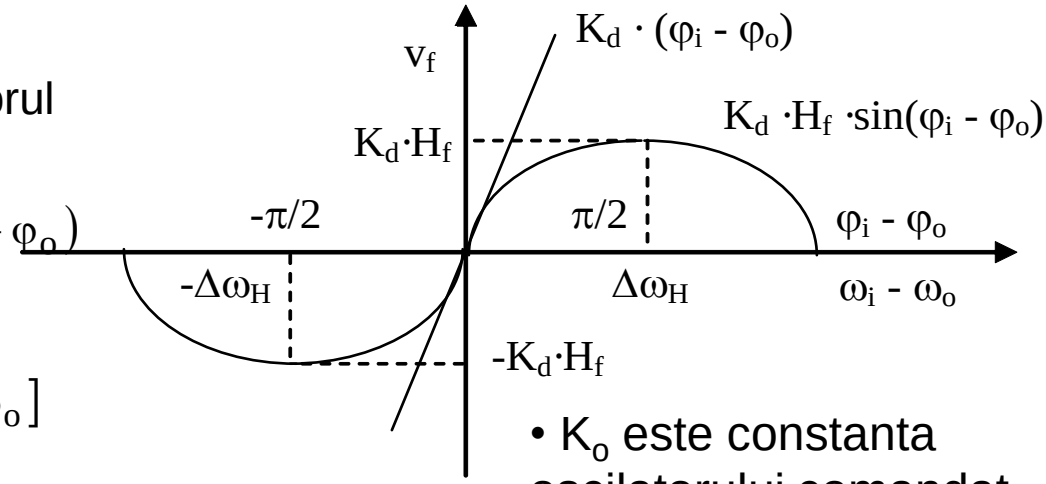
Recuperarea tactului

- În stare de echilibru frecvenţa oscilatorului local este identică cu frecvenţa semnalului de intrare şi cele două semnale se găsesc într-o relaţie de fază fixă;
  - diferenţa de fază dintre cele două semnale depinde de diferenţa de frecvenţă dintre semnalul de intrare şi frecvenţa de oscilaţie liberă a oscilatorului comandat.
- Relaţia dintre semnalul de comandă al oscilatorului local şi diferenţa de fază şi de frecvenţă dintre semnalul recepţionat şi semnalul generat de oscilatorul local:
  - semnal de intrare în comparatorul de fază şi de ieşire din VCO:

$$v_i(t) = A_i \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i);\ v_o(t) = A_o \cdot \cos(\omega_o t + \varphi_o)$$

  - semnal de ieşire din FTJ:

$$v_f = \frac{K_d \cdot H_f \cdot V_i \cdot V_o}{2} \cdot \sin[(\omega_i - \omega_o)t + \varphi_i - \varphi_o]$$

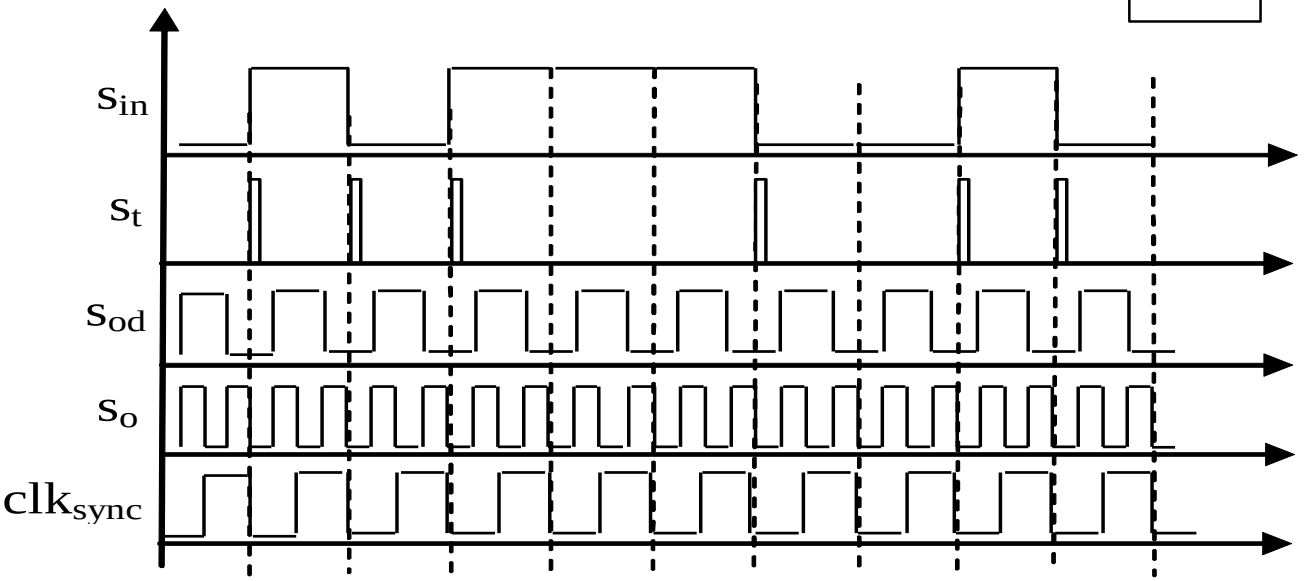


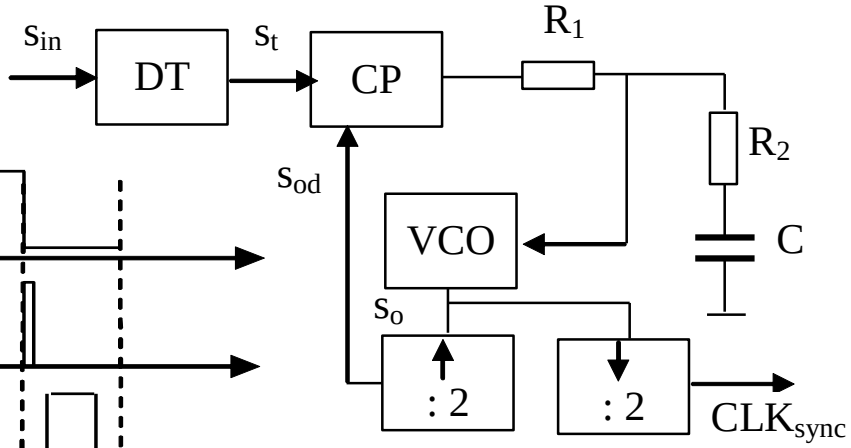
- K_o este constanta oscilatorului comandat.

  - diferenţa maximă de frecvenţă $\Delta\omega_H$ dintre semnalul de intrare şi semnalul generat de VCO: $\Delta\omega_H = K_o \cdot K_d \cdot H_f$

Recuperarea tactului

- Utilizarea circuitului PLL pentru recuperarea tactului local:
  - Necesită rezolvarea problemei defazajului cu 90° a semnalului local sincronizat faţă de semnalul recepţionat;
  - Schema bloc a unui circuit de sincronizare a tactului de bit realizat cu circuit PLL şi diagrama de semnale asociată funcţionării.





Jitterul în sisteme digitale

- Definirea noţiunii de jitter: diferă foarte mult în cazul sistemelor analogice şi digitale:
  - În cazul sistemelor analogice jitterul de datorează sistemelor de multiplexare în frecvenţă;
    - reprezintă o modulaţie parazită de fază, caracterizată de:
      - amplitudine (valoare maximă a deviaţiei de fază);
      - frecvenţă (frecvenţa cu care se modifică faza).
  - În cazul sistemelor digitale jitterul reprezintă variaţia momentelor semnificative ale semnalului digital faţă de valoarea ideală;
    - există diferenţe semnificative între cauzele care provoacă jitterul în cele două tipuri de sisteme;
    - în sistemele digitale jitterul poate apare sub două forme, şi anume:
      - variaţii pe termen scurt ale momentelor semnificative ale semnalului;
        - acest fenomen este numit efectiv jitter.
      - variaţii de fază pe termen lung – fenomenul de „wander”;
        - sunt variaţii lente ale momentelor semnificative ale semnalului digital faţă de poziţia ideală.

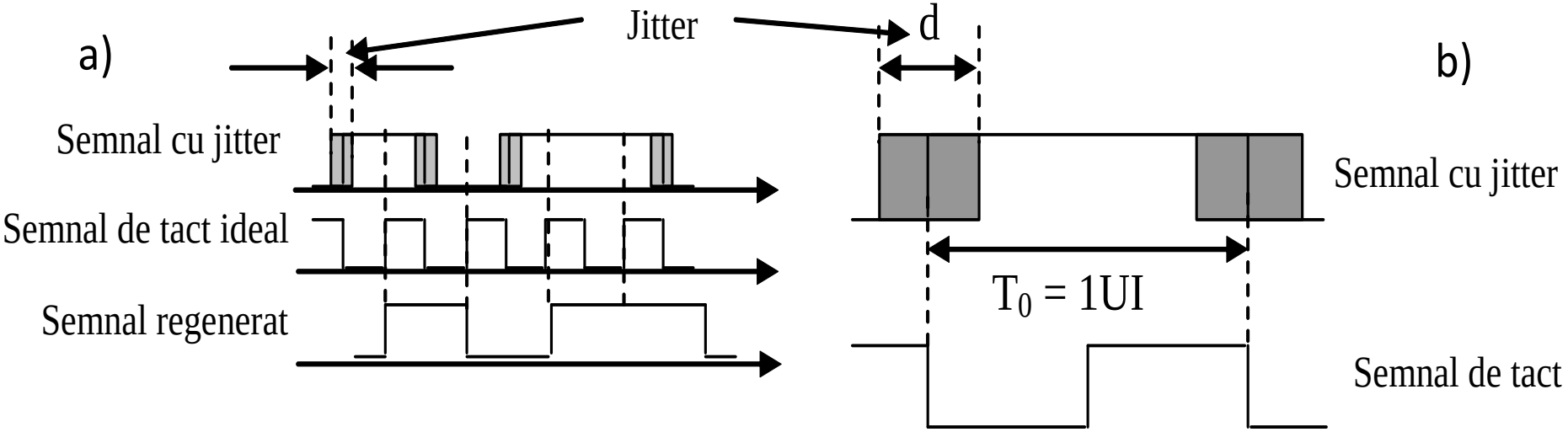
Jitterul în sisteme digitale

- Diferenţa dintre cele două forme de variaţii de fază (jitter/wander) este legată doar de gama de frecvenţe;
  - nu există o definiţie clară a limitei de frecvenţă dintre jitter şi wander;
    - de regulă variaţiile de fază care au frecvenţa sub 10Hz sunt numite wander.
- Fenomenul de jitter observabil la ieşirea unei secţiuni digitale;

  - semnalul digital înainte de regenerare prezintă o deplasare a fronturilor de o parte şi de alta a poziţiei ideale, având ca referinţă semnalul de tact;
  - dacă semnalul de tact ar fi complet lipsit de jitter, atunci procesul de regenerare prin eşantionare la mijlocul elementelor de semnal poate conduce la recuperarea fără jitter a semnalului digital;
  - excursia maximă, vârf-vârf, a tranziţiilor semnalului înainte de regenerare, este egală cu durata T_0 a unui element de semnal:
    - interval unitate UI (“Unit Interval”);
  - depăşirea acestei valori duce la decizie eronată;
    - amplitudinea vârf-vârf a jitterului se poate exprima şi în procente.

Jitterul în sisteme digitale

- Eliminarea jitterului prin regenerare ideală – fig a);
- Definirea valorii vârf la vârf a jitterului – fig. b);



- De observat că în transmisiunile de date termenului de jitter îi corespunde termenul uzual de distorsiune telegrafică totală, exprimată în procente;
  - cele două fenomene au o conotaţie comună.

Jitterul în sisteme digitale

- Toleranţa la jitter;
  - Valoarea maximă a jitterului pentru care nu apar decizii eronate;
  - Diferă în funcţie de frecvenţa jitterului astfel:
    - la frecvenţe joase ale jitterului este posibilă depăşirea limitei de 1 UI fără apariţia deciziilor eronate;
      - semnalul de tact recuperat preia aproape în întregime acest jitter, urmărind variaţiile de fază lente ale semnalului recepţionat şi realizând o eşantionare corectă
        - sistemul poate tolera o variaţie de fază mai mare de 1 UI (chiar mult mai mare).
      - dispozitivele de recuperare a tactului au o caracteristică de transfer în domeniul frecvenţă de tip trece jos;
        - apar numai componente de jitter de frecvenţă joasă în semnalul regenerat.
    - la frecvenţe mari ale jitterului, tactul recuperat (din semnalul digital) nu poate urmării jitterul
      - amplitudinea vârf-vârf a jitterului nu poate depăşii 1 UI, fiind în realitate fracţiuni de UI.

Jitterul în sisteme digitale

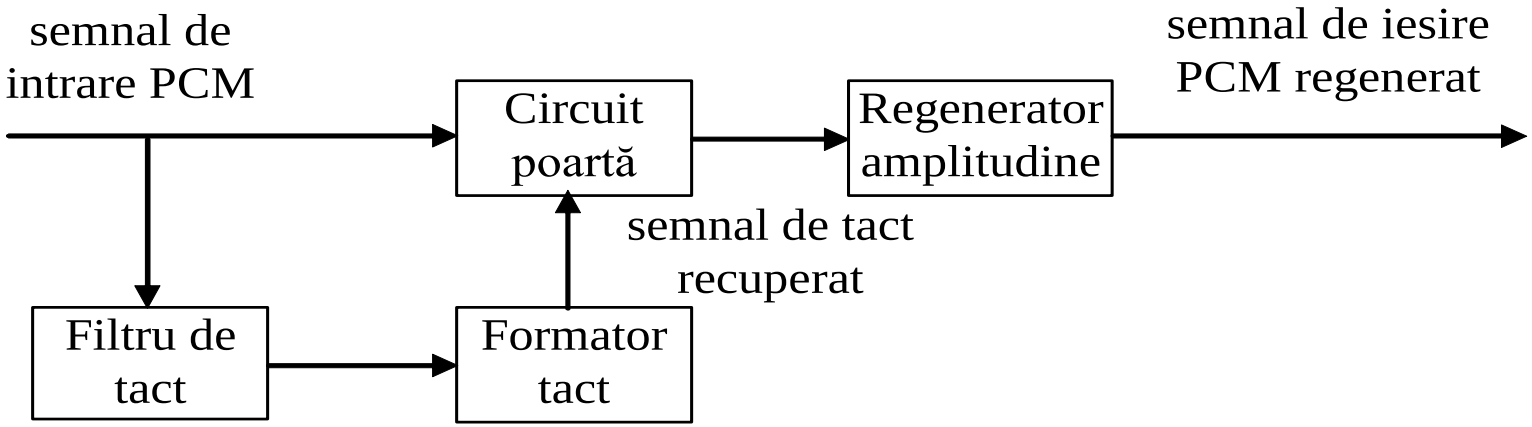
- Efectul jitterului şi a wanderului constau în următoarele:
  - Se modifică (scade) rezerva transmisiunilor digitale la alte imperfecţiuni ale canalului (de ex. zgomot);
  - Depăşirea unei limite duce le creşterea semnificativă a probabilităţii de eroare pe secţiunile digitale;
    - acest efect se reflectă în canalele vocale sub formă de zgomot de impulsuri şi zgomot de fond.
  - Apariţia unui jitter analogic în canalul vocal analogic;
    - acest jitter apare în procesul de conversie D/A din sistemele PCM datorită jitterului asociat tactului care se transmite sub formă de modulaţie parazită de poziţie asupra impulsurilor cu modulaţie de amplitudine (PAM).

Jitterul în sistemele digitale

- Jitterul se poate clasifica în:
  - Variaţii sistematice;
    - variaţii de fază dependente de structura semnalului digital (variaţii dependente de diagramă – „pattern-dependent”);
    - aceste variaţii de fază apar datorită mai multor unităţi digitale identice conectate în tandem şi corelate;
      - efectul este pronunţat cumulativ.
  - Variaţii nesistematice:
    - presupune absenţa corelaţiei sau un grad de corelare redus a diverselor surse de jitter;
    - aceste variaţii de fază au un caracter stohastic (sau semistohastic) şi nu depind de secvenţa de semnal digital (variaţii independente de diagramă – „pattern-independent”);
    - acest tip de jitter are o influenţă redusă asupra calităţii transmisiei;
      - efectul este slab cumulativ.

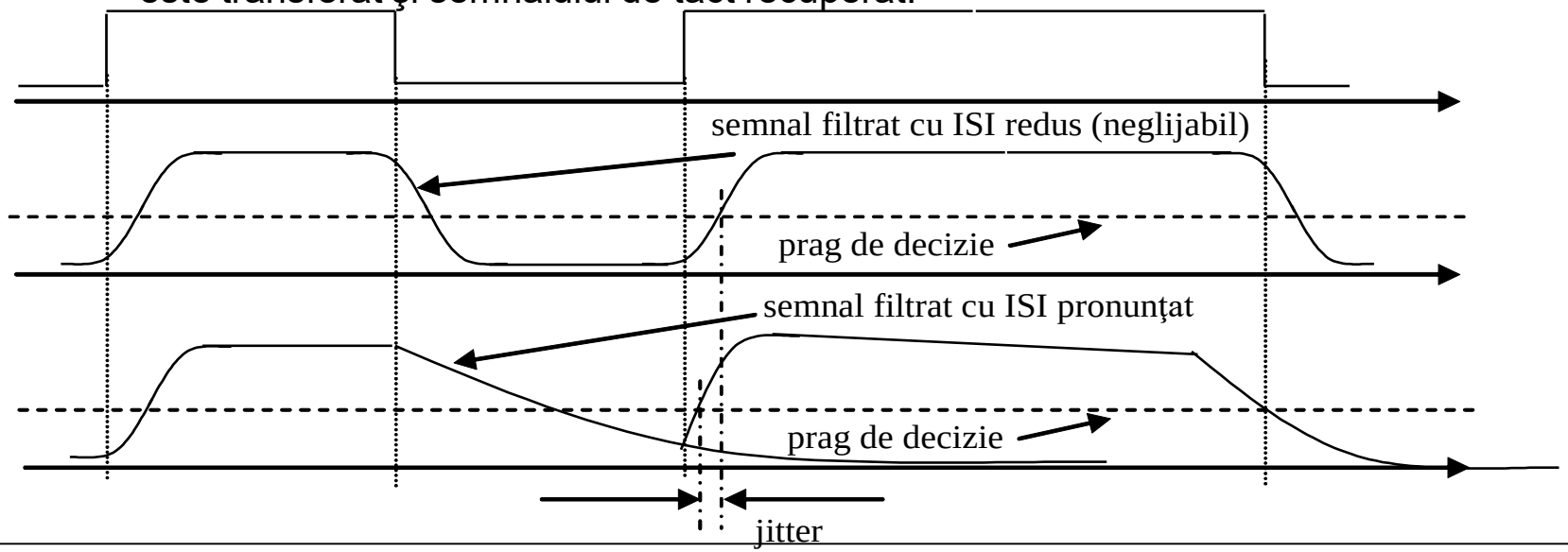
Originea jitterului

- Sursele de jitter cele mai reprezentative:
  - **Regeneratorul digital:**
    - un regenerator reface semnalul digital de la intrare cu ajutorul unui semnal de tact, extras din semnalul recepţionat;
    - datorită imperfecţiunilor de refacere a tactului, acesta conţine o modulaţie de fază care este transmisă semnalului digital regenerat, sub formă de jitter;
    - în procesul de regenerare fiecare regenerator distorsionează semnalul de tact şi prin intermediul acestuia generează jitter în semnalul de la ieşire;
      - acest jitter se însumează cu jitterul generat de alte generatoare ale lanţului de transmisie.
  - Ideea de bază a regenerării semnalelor digitale:



Originea jitterului

- Imperfecţiunile care afectează procesul de recuperare a tactului:
  - Interferenţa între simboluri ISI („Intersymbol Interference”);
    - distorsiunile de atenuare şi de timp de grup introduse de linia de transmisie insuficient egalizată modifică forma impulsurilor recepţionate.
      - rezultă deformarea elementelor de semnal (rotunjire fronturi, prelungire în timp) şi apariţia fenomenului de ISI - suprapunerea simbolurilor adiacente;
    - apare astfel un fenomen de jitter după limitarea semnalului digital;
      - jitter dependent puternic de structura semnalului;
      - este transferat şi semnalului de tact recuperat.

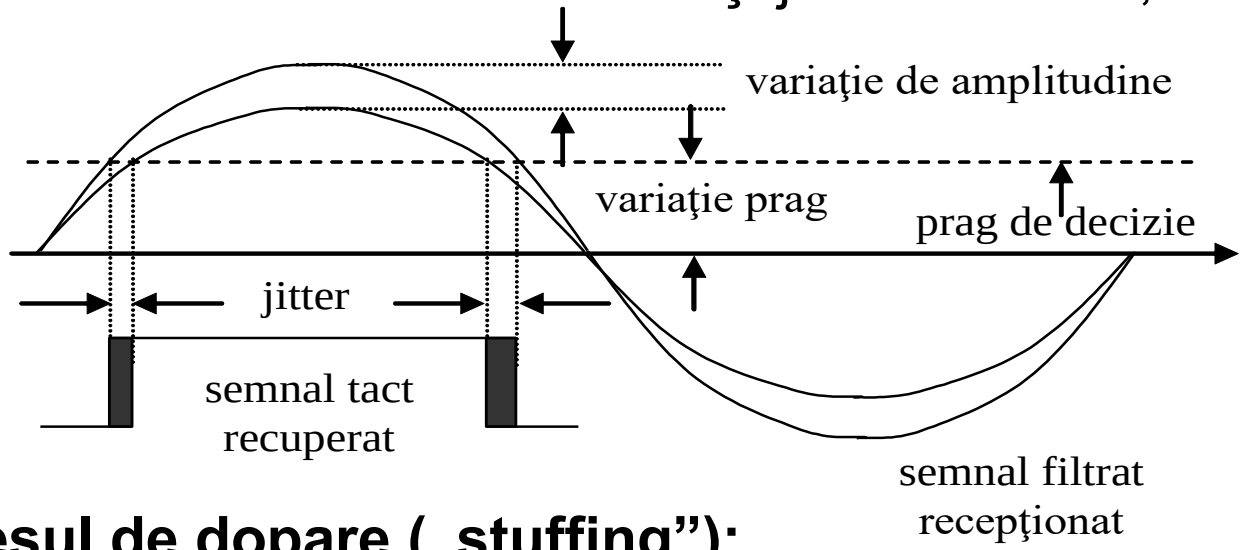


Originea jitterului

- Eroarea ΔF a frecvenţei de rezonanţă a circuitului de extragere a tactului;
  - dispozitivului de extragere a tactului se comportă ca un filtru de bandă îngustă acordat pe frecvenţa de tact;
  - în lipsa impulsurilor de sincronizare oscilaţiile generate de circuitul de extragere se amortizează;
  - dacă există o diferenţă ΔF între frecvenţa circuitului acordat şi frecvenţa de tact a semnalului recepţionat resincronizarea după o perioadă în care nu avem impulsuri introduce un salt de fază în semnalul de tact local recuperat;
    - apare deci un jitter dependent de structura secvenţei de semnal.
- Conversia MA/MΦ;
  - este determinat de comparatorul de amplitudine din blocul de regenerare a impulsurilor (regeneratorul de amplitudine);
    - jitterul apare datorită modificării pragului de comparaţie şi / sau a amplitudinii semnalului recepţionat.

Originea jitterului

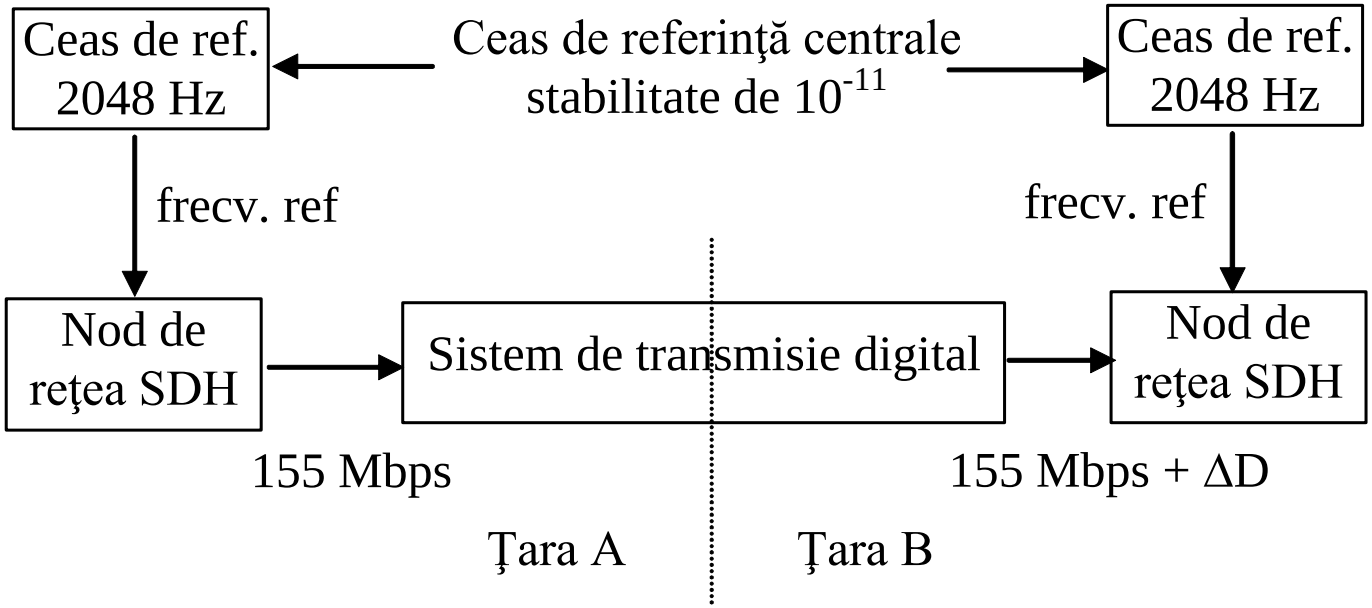
- Fenomenul de conversie MA/MΦ şi jitterul asociat;



- **Procesul de dopare („stuffing”);**
  - jitterul asociat procesului de dopare apare la ieşirea echipamentelor de demultiplexare de ordin superior, atunci când procesul de multiplexare operează asupra mai multor afluenţi plesiocroni;
  - acest jitter este format din două componente de jitter:
    - jitterul de dopare: atunci când procesul de dopare apare imediat la cerere;
    - jitterul de aşteptare: este definit ca şi un jitter de joasă frecvenţă;
      - există în realitate un timp de aşteptare între cererea de dopare şi execuţia acesteia.

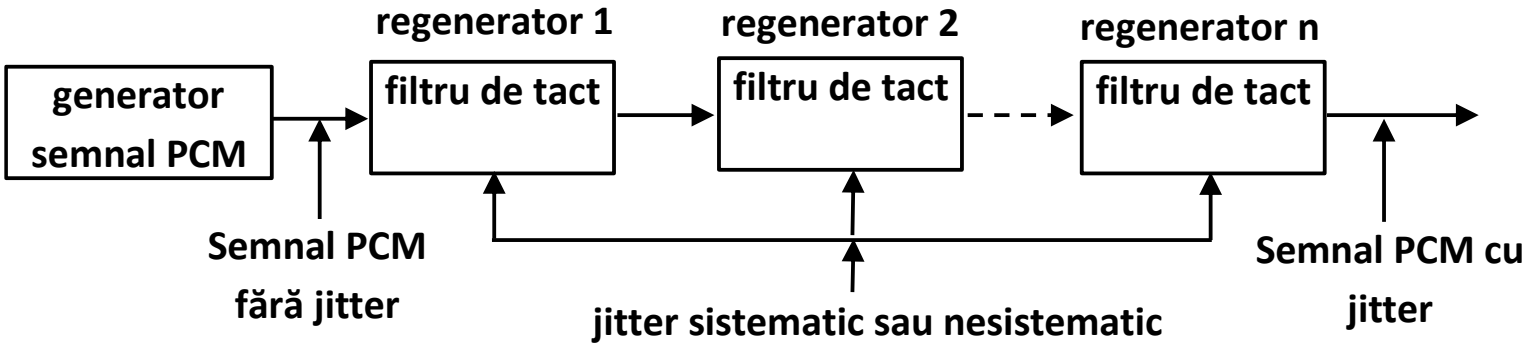
Originea jitterului

- **Wanderul**;
  - Poate apare din mai multe motive cele mai importante fiind:
    - variaţia caracteristicilor mediului de transmisie;
    - variaţia generatoarelor de tact din nodurile reţelelor digitale.
  - Apariţie fenomenului de „wander”;



Acumularea jitterului

- Se consideră două situaţii posibile şi anume:
  - **1. Lanţ de regeneratoare în cascadă:**
    - caracterul jitterului este preponderent sistematic (dependent de secvenţa semnalului digital);
    - cauza principală: imperfecţiunile circuitelor de recuperare a tactului;



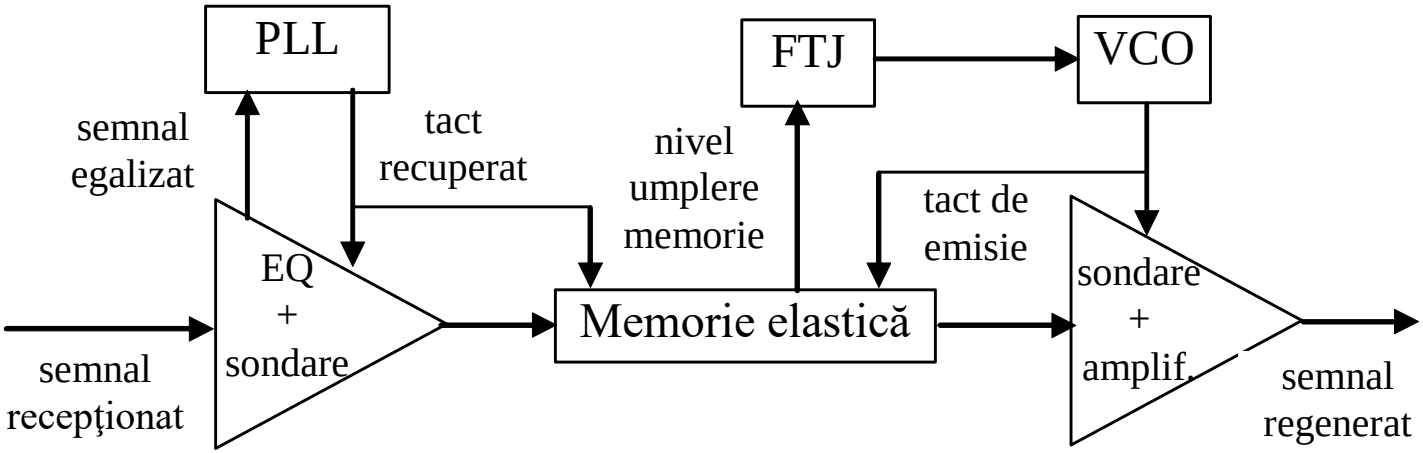
  - Acumularea jitterului aleator pe un lanţ de regeneratoare cu surse de jitter necorelate:
    - legea de însumare este : $J_N = J_1 \cdot \sqrt[4]{N}$
    - J_1 este valoarea eficace a jitterului generat de fiecare generator, J_N este valoarea eficace însumată;
    - acestă situaţie are o importanţă minoră în transmisiile digitale.

Acumularea jitterului

- Acumularea jitterului sistematic generat pe un lanţ de regeneratoare cu surse de jitter corelate: dependente de secvenţa de biţi;
  - legea de însumare a jitterului sistematic : $J_N = J_1 \cdot \sqrt{2N}$
  - J_1 este valoarea eficace a jitterului generat de fiecare regenerator;
  - valorile lui J_1 se găsesc de regulă în gama 0,4 – 1,5% din UI;
  - dacă se utilizează bucle PLL pentru refacerea tactului legea de însumare este: $J_N = J_1 \cdot \sqrt{2NA}$
    - A este un factor dependent de numărul de regeneratoare şi de caracteristicile buclei PLL;
  - acestă situaţie are o importanţă majoră în transmisiile digitale;
  - distribuţie probabilistică a amplitudinilor jitterului acumulat apropiată de cea gaussiană;
    - un raport valoare vârf-vârf / valoare eficace de 12 – 15 este uzual şi corespunde unei probabilităţi reduse de depăşire a valorii de vârf.

Acumularea jitterului

- Mijloace de reducere a jitterului pe un lanţ de regeneratoare:
  - utilizarea în regeneratoare a unor dispozitive de transformare care operează asupra secvenţei de semnal:
    - secvenţe SPA, scrambler, însumarea semnalului cu versiuni întârziate ale lui.
  - utilizarea unor memorii tampon în regenerator care preiau variaţiile bruşte ale tactului refăcut;
    - dispozitivele de reducere a jitterului
    - numite „jitter reducer” sau compensatoare de jitter;
    - tactul de emisie este comandat de nivelul de umplere al memoriei tampon.
- Regenerator echipat cu compensator de jitter;



Acumularea jitterului

- Acumularea jitterului în sisteme care conţin dispozitive scrambler/descrambler şi dispozitive de reducere a jitterului;
  - în aceste sisteme regeneratoarele se comportă ca şi surse necorelate de jitter;
  - legea de însumare este : $J_M = J_S \cdot \sqrt[4]{K \cdot N}$
  - J_S este jitterul eficace al unui sistem, K constantă cu valoare între 1 şi 2 (K=2 pentru N mare), N numărul de sisteme digitale.

- **2. Echipamente de multiplexare – demultiplexare:**
  - apare o acumulare a jitterului de aşteptare: $J_S \cdot \sqrt[4]{N} \le J_M \le J_S \cdot \sqrt{N}$
  - J_M : valoarea eficace a jitterului cumulat;
  - J_S : jitterul echipamentelor individuale;
  - N : numărul de echipamente de multiplexare.

Performanţe de jitter

- Performanţe de jitter ale transmisiilor digitale cu diferite debite din reţelele de transmisie plesiocrone;
  - Performanţele se referă la limitele maxim admise pentru amplitudine jitter şi pentru wander;
  - Limite impuse pentru amplitudine maximă jitter;

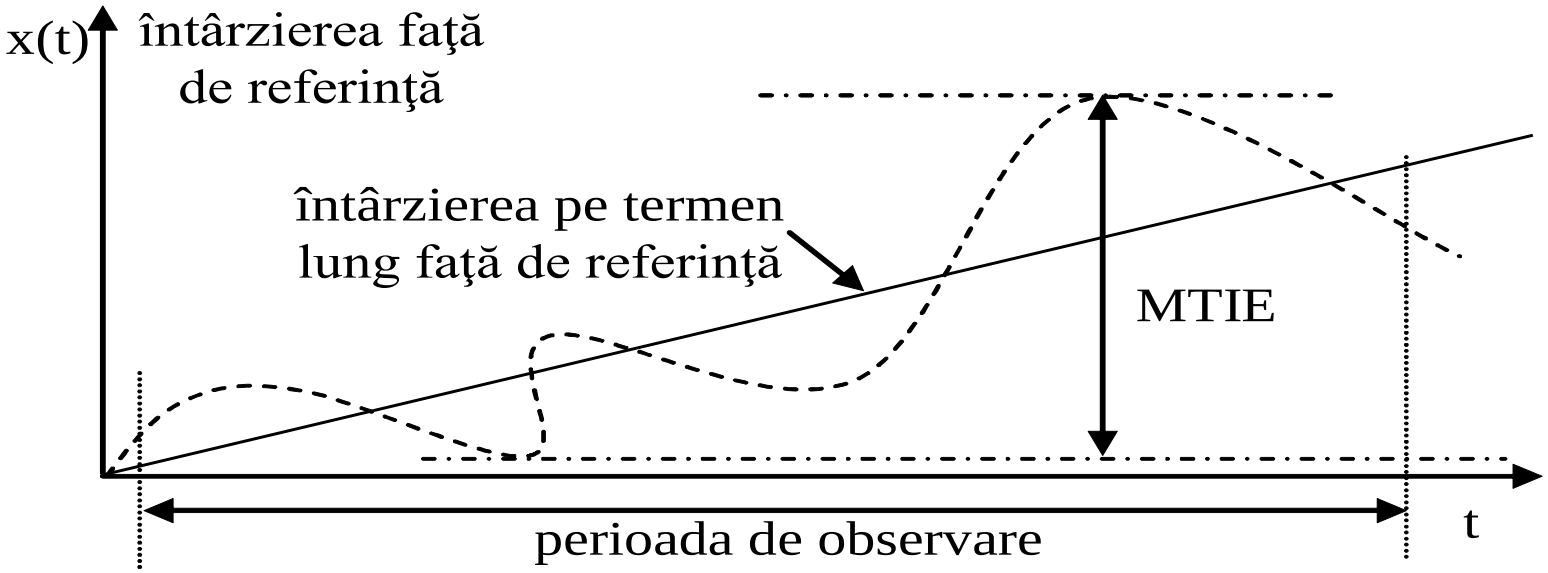
Tip jitter → Debit binar (kbps) ↓	Jitter măsurat în bandă largă		Jitter măsurat în bandă redusă	
	Valoare maximă vârf la vârf în UI	Bandă de frecvenţă de măsură	Valoare maximă vârf la vârf în UI	Bandă de frecvenţă de măsură
64	0,25	20Hz÷20kHz	0,05	3kHz÷20kHz
2048	1,5	20Hz÷100kHz	0,2	18kHz÷100kHz
8448	1,5	20Hz÷400kHz	0,2	3kHz÷400kHz
34368	1,5	100Hz÷800kHz	0,15	10kHz÷800kHz
139264	1,5	200Hz÷3500kHz	0,075	10kHz÷3500kHz

Performanţe de jitter

- Limitele pentru wander;
  - Wanderul este un fenomen lent determinat de:
    - caracteristicile mediului;
    - îmbătrânirea generatoarelor de tact;
  - Wanderul poate duce la fenomenul de alunecare;
    - se defineşte parametrul MTIE (“Maximum Time Interval Error”):
      - variaţia vârf la vârf a întârzierii semnalului recepţionat faţă de unul ideal (de ex. un tact de referinţă) într-un interval de timp S;
      - pentru $S>10^4$s avem: $TIE = \left(10^{-2} \cdot S + 10000\right) ns$
  - Cazul reţelelor sincronizate independent:
    - valoarea TIE dintre semnalul de intrare şi semnalul de sincronizare al echipamentului în care se termină legătura poate depăşi valoarea maximă permisă a wanderului şi pot apare alunecări de tact cu o frecvenţă cuprinsă între 1 şi 70 zile.

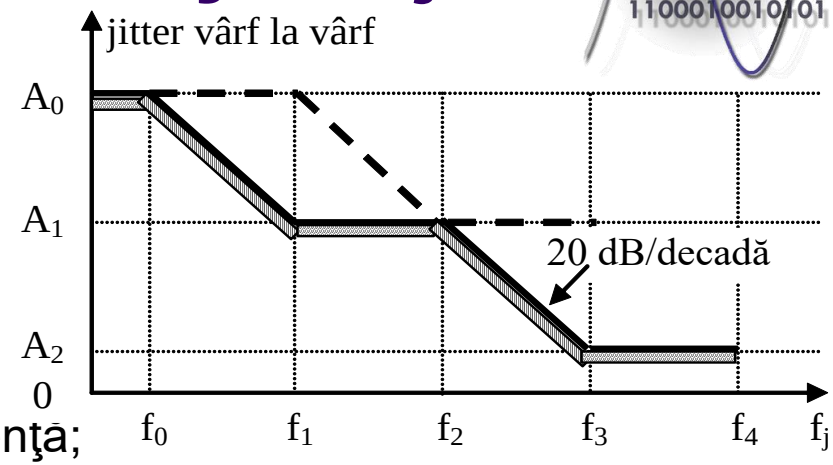
Performanţe de jitter

- Definirea parametrului MTIE asociat „wanderului”;



Performanţe de jitter

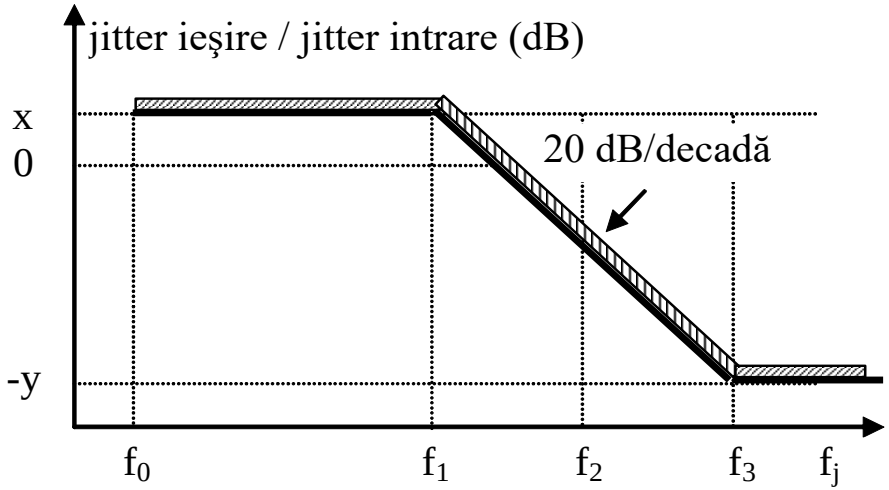
- Limite maxime admise ale valorii vârf la vârf ale jitterului şi „wanderului” – toleranţă la jitter şi wander;
  - Caracteristica jitter vârf la vârf – frecvenţă;



Valori param. → / Debit binar (kbps) ↓	Valoare vârf la vârf jitter (UI)			Frecvenţa (Hz)				
	A_0	A_1	A_2	f_0 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (kHz)	f_4 (kHz)
64	1,15	0,25	0,05	$1{,}2\times10^{-5}$	20	600	3	20
2048	36,9	1,5	0,2	$1{,}2\times10^{-5}$	20	2400 (93)	18 (0.7)	100
8448	152	1,5	0,2	$1{,}2\times10^{-5}$	20	400 (10700)	3 (80)	400
34368		1,5	0,15		100	1000	10	800
139264		1,5	0,075		200	500	10	3500

Performanţe de jitter

- Caracteristica de transfer a jitterului a echipamentelor digitale;
  - Caracteristica $H(f_j)$ a jitterului reprezintă raportul dintre jitterul de la ieşire a unui echipament şi jitterul de intrare, exprimat în dB în funcţie de frecvenţă, la un debit binar specificat;
    - în general se atenuează componentele de jitter peste o anumită frecvenţă;
    - caracteristica generală $H(f_j)$ este de tip trece jos.



- Jitterul maxim la ieşirea echipamentelor digitale;
- Jitterul maxim la ieşirea secţiunilor digitale.