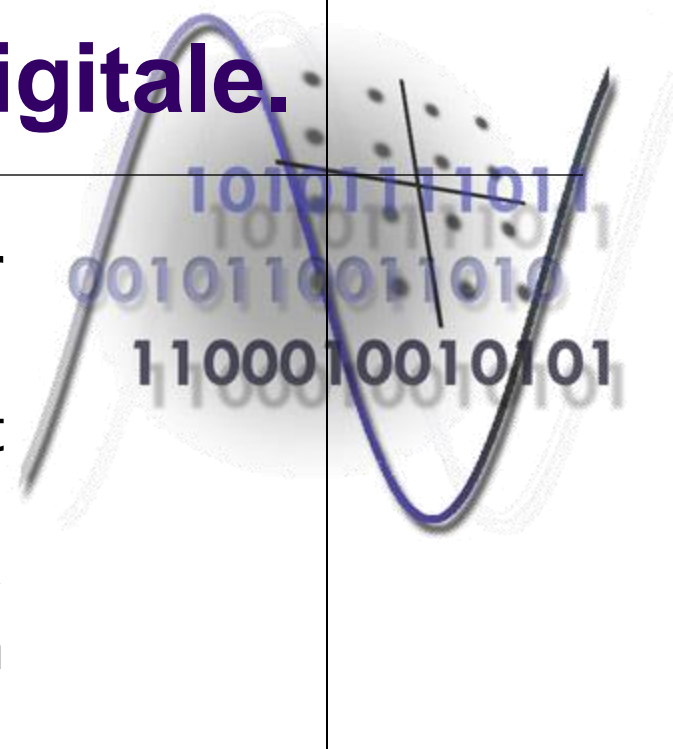


Curs 11

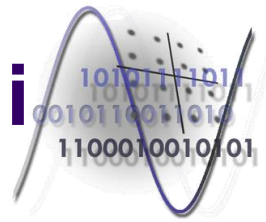
Regeneratorul digital. Jitterul în sistemele de transmisii telefonice digitale.

Zsolt Polgar

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

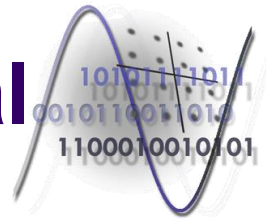


Conținutul cursului



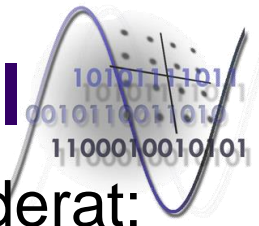
- Regeneratorul digital;
 - Caracteristici / rol;
 - Schemă bloc;
 - Recuperarea tactului de bit.
- Jitterul în sisteme de transmisii digitale;
 - Definiție / caracteristici;
 - Originea jitterului;
 - Acumularea / compensarea jitterului;
 - Performanțe de jitter.

Regeneratorul digital



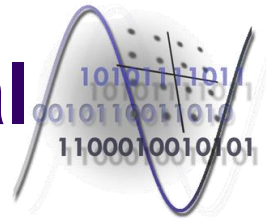
- Regeneratorul: releu de retransmisie, care realizează următoarele operații:
 - Extrage din semnalul de linie recepționat biții de informație;
 - Recodează acești biți;
 - Transmite mai departe semnalul recodat.
- Rolul regeneratorului într-un sistem digital:
 - Reducerea efectului distorsiunilor și a zgomotelor introduse de canal;
 - nivelul distorsiunilor liniare și neliniare și a zgomotelor introduse de un canal crește proporțional cu lungimea mediului de transmisie;
 - nivelul semnalului transmis scade de asemenea proporțional 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 condiții impuse de probabilitate de eroare pe bit;
 - etajul de intrare al unui multiplexor este tot un regenerator.

Regeneratorul digital



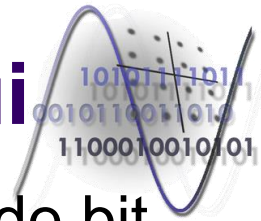
- Blocurile componente ale tipului de regenerator considerat;
 - Circuite liniare de intrare cu următoarele funcții:
 - conectare la linie;
 - filtrare semnal recepționat pentru reducerea zgomotului;
 - amplificare semnal recepționat până la un nivel constant;
 - egalizare semnal recepționat pentru reducerea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

Regeneratorul digital

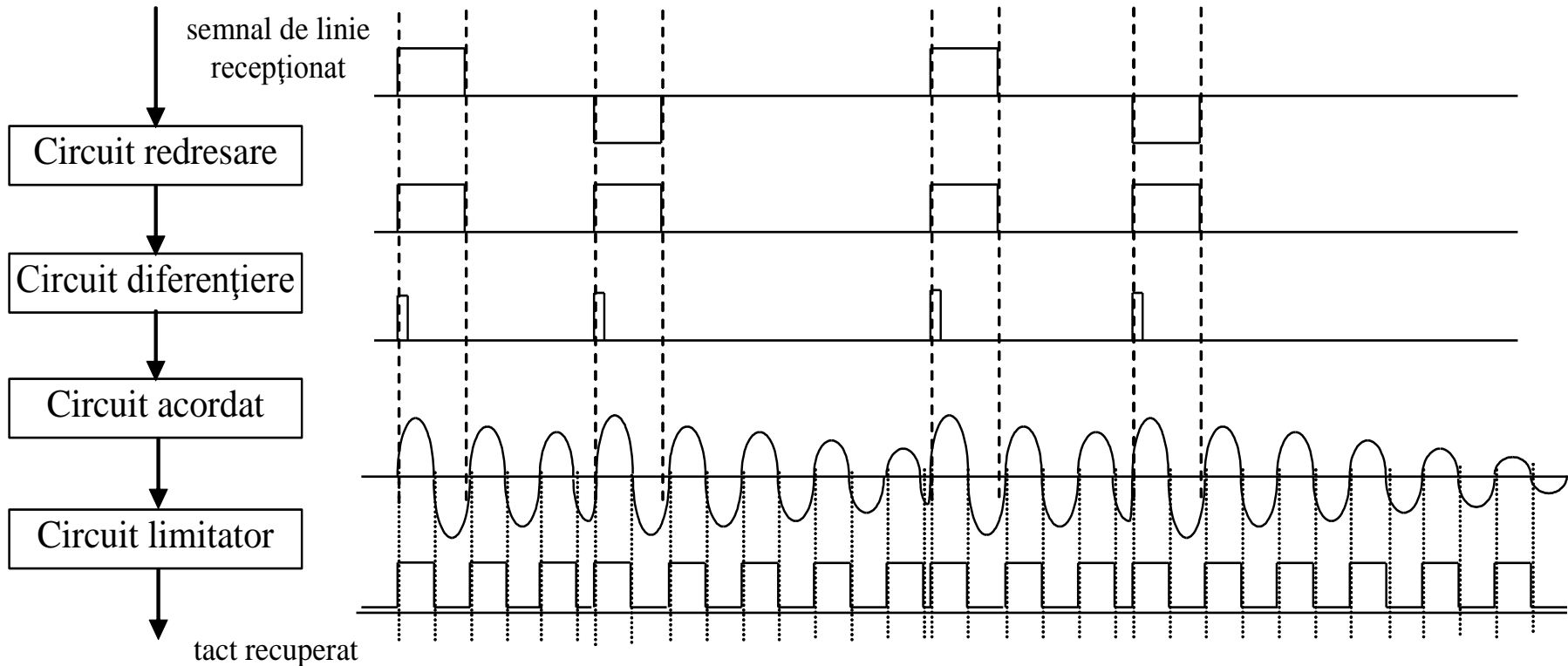


- Circuite de recuperare a tactului:
 - recuperează tactul din semnalul de linie;
 - se utilizează acest tact pentru citirea impulsurilor recepționate de pe linie și pentru formarea unor impulsuri de lățime standard.
- Circuite auxiliare:
 - telealimentare;
 - localizare deranjamente;
 - protecție la supracurenți și supratensiuni.
- Funcționarea regeneratoarei:
 - impulsurile redresate sunt aplicate circuitului de recuperare al tactului;
 - valoarea de vârf a impulsurilor comandă egalizorul automat și preamplificatorul de intrare;
 - semnalul de intrare egalizat este comparat cu două praguri la momente de timp date de fronturile tactului recuperat;
 - valorile logice obținute în urma acestei sondări sunt memorate în bistabilele B+ și B- și se aplică etajului de ieșire.

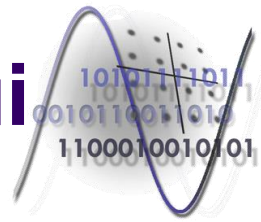
Recuperarea tactului



- O structură simplă de circuit de recuperare al tactului de bit este așa numitul filtru de tact:
 - Schema bloc și diagrama de semnale corespunzătoare funcționării:



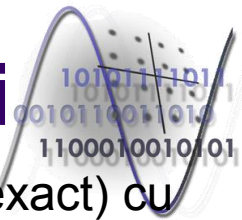
Regenerarea tactului



- Functionarea filtrului de tact:

- impulsurile recepționate obținute după egalizor și amplificator sunt redresate și apoi diferențiate:
 - se obțin impulsuri de aceeași polaritate care marchează fronturile (trecerile prin zero) ale semnalului recepționat;
 - frecvența și faza acestor impulsuri este identică cu frecvența și faza medie a tactului de la emisie.
- Impulsurile generate se aplică unui circuit acordat care oscilează pe frecvența tactului local; semnalul generat de acest circuit este apoi limitat;
 - circuitul oscilant este un filtru trece bandă îngust care extrage fundamentală impulsurilor obținute după circuitul de diferențiere.
 - în urma limitatorului se obține tactul local recuperat.
- semnalul generat de circuitul acordat se amortizează între două impulsuri consecutiv;
 - amortizarea este cu atât mai accentuată cu cât această distanță este mai mare.
- frecvența semnalului generat de către circuitul acordat nu este chiar identică cu frecvența tactului de emisie;
 - nu sunt generate impulsuri la fiecare margine de bit, din cauza nivelelor de zero volți din cazul semnalului AMI.

Recuperarea tactului



- frecvența de oscilație 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 performanțe destul de reduse în ceea ce privește precizia frecvenței și 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 condiții mai puțin restrictive tactului recuperat (datorită numărului redus de nivele pe linie).
- Funcția de transfer în fază între intrarea și ieșirea circuitului:

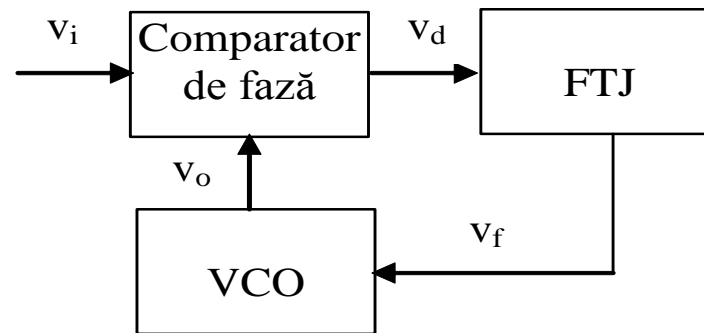
$$C(s) = \frac{1}{1 + s/B}$$

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

Recuperarea tactului



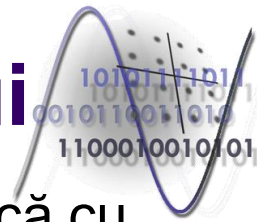
- Îmbunătățirea performanțelor filtrului de tact se poate realiza prin aplicarea semnalului generat de limitator unui circuit PLL;
 - circuitul PLL reduce semnificativ variațiile de frecvență și de fază pe care le prezintă semnalul obținut după limitator sau circuitul acordat.
- Schema bloc de principiu circuitului PLL (“Phase Locked Loop”)



- **Funcționare:**

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

Recuperarea tactului



- În stare de echilibru frecvența oscilatorului local este identică cu frecvența semnalului de intrare și cele două semnale se găsesc într-o relație de fază fixă;
 - diferența de fază dintre cele două semnale depinde de diferența de frecvență dintre semnalul de intrare și frecvența de oscilație liberă a oscilatorului comandat.
- Relația dintre semnalul de comandă al oscilatorului local și diferența de fază și de frecvență dintre semnalul recepționat și semnalul generat de oscilatorul local:

- semnal de intrare în comparatorul de fază și de ieșire din VCO:

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

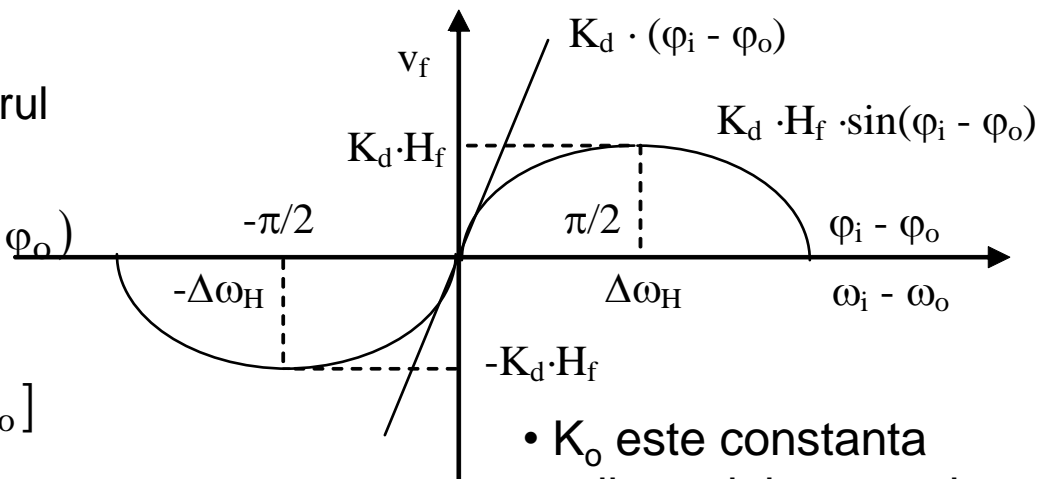
- semnal de ieșire din FTJ:

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

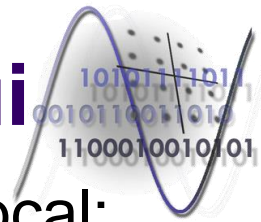
- diferența maximă de frecvență $\Delta\omega_H$ dintre semnalul de intrare și semnalul generat de VCO:

• K_o este constanta oscilatorului comandat.

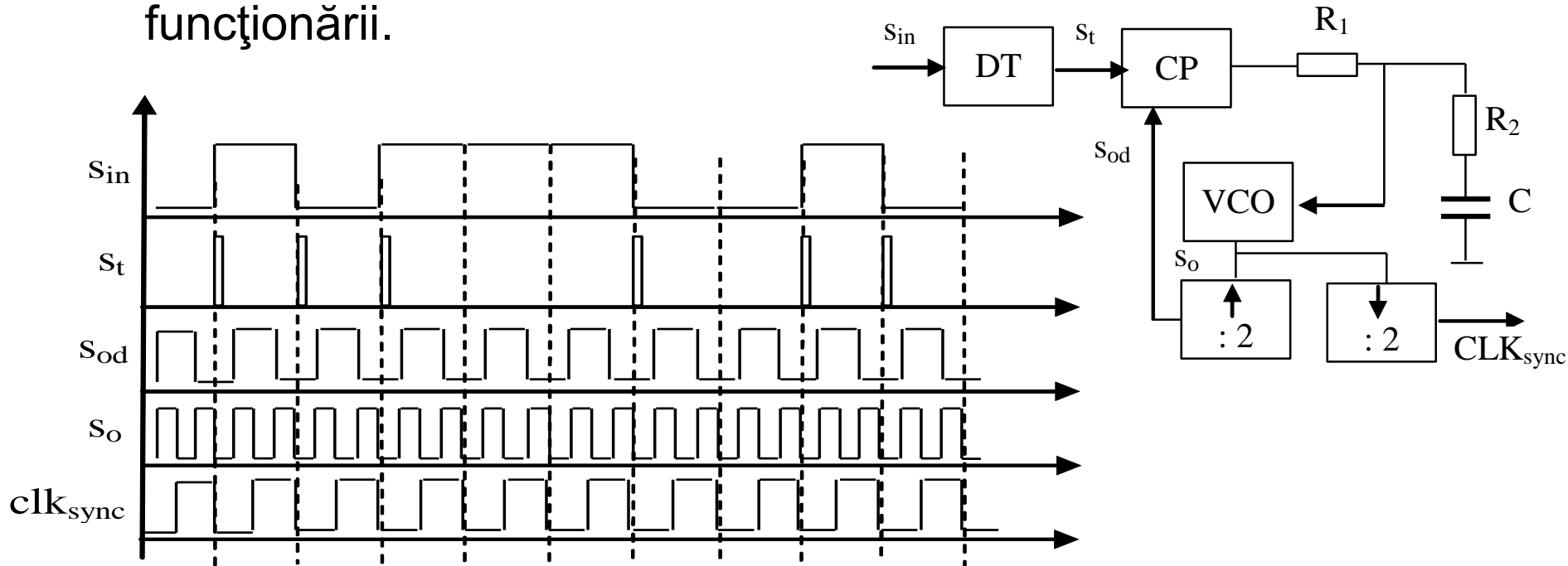
$$\Delta\omega_H = K_o \cdot K_d \cdot H_f$$



Recuperarea tactului



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

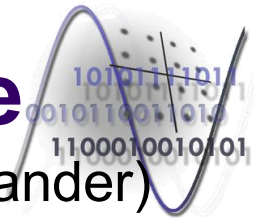


Jitterul în sisteme digitale



- Definirea noțiunii de jitter: diferă foarte mult în cazul sistemelor analogice și digitale:
 - În cazul sistemelor analogice jitterul de datorează sistemelor de multiplexare în frecvență;
 - reprezintă o modulație parazită de fază, caracterizată de:
 - amplitudine (valoare maximă a deviației de fază);
 - frecvență (frecvența cu care se modifică faza).
 - În cazul sistemelor digitale jitterul reprezintă variația momentelor semnificative ale semnalului digital față de valoarea ideală;
 - există diferențe semnificative între cauzele care provoacă jitterul în cele două tipuri de sisteme;
 - în sistemele digitale jitterul poate apare sub două forme, și anume:
 - variații pe termen scurt ale momentelor semnificative ale semnalului;
 - acest fenomen este numit efectiv jitter.
 - variații de fază pe termen lung – fenomenul de „wander”;
 - sunt variații lente ale momentelor semnificative ale semnalului digital față de poziția ideală.

Jitterul în sisteme digitale



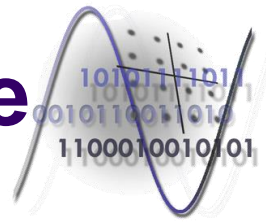
- Diferența dintre cele două forme de variații de fază (jitter/wander) este legată doar de gama de frecvențe;
 - nu există o definiție clară a limitei de frecvență dintre jitter și wander;
 - de regulă variațiile de fază care au frecvența sub 10Hz sunt numite wander.

● Fenomenul de jitter observabil la ieșirea unei secțiuni digitale;

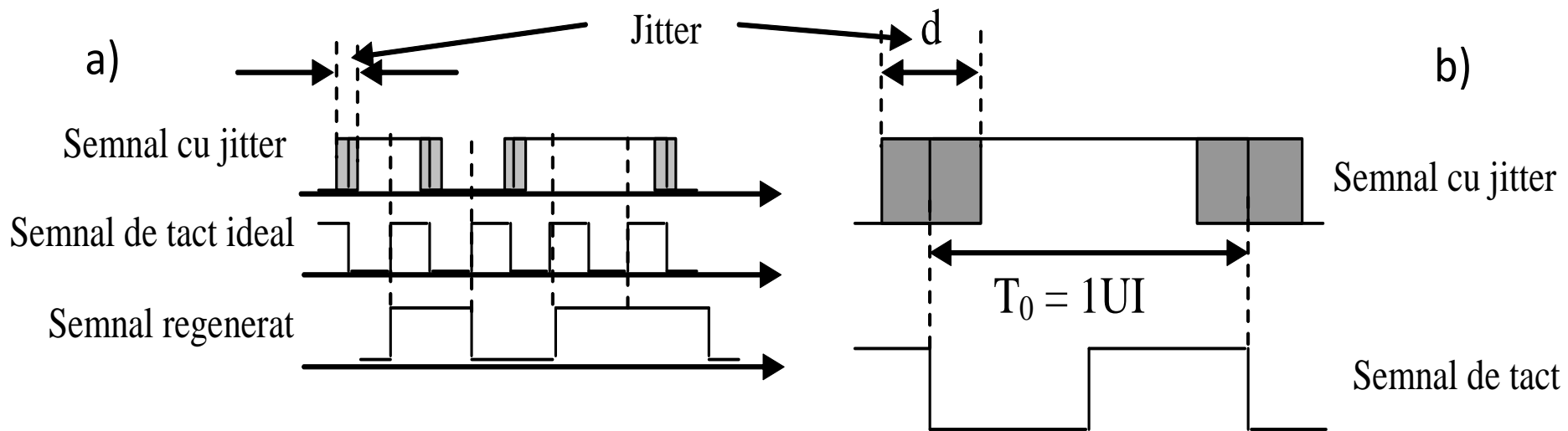


- semnalul digital înainte de regenerare prezintă o deplasare a fronturilor de o parte și de alta a poziției ideale, având ca referință semnalul de tact;
- dacă semnalul de tact ar fi complet lipsit de jitter, atunci procesul de regenerare prin eșantionare la mijlocul elementelor de semnal poate conduce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

Jitterul în sisteme digitale

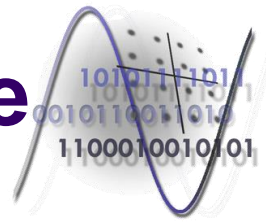


- Eliminarea jitterului prin regenerare ideală – fig a);
- Definirea valorii vârf la vârf a jitterului – fig. b);



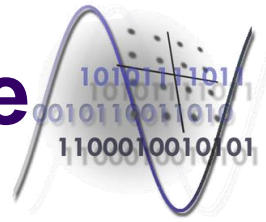
- De observat că în transmisiunile de date termenul de jitter îi corespunde termenul uzual de distorsiune telegrafică totală, exprimată în procente;
 - cele două fenomene au o conotație comună.

Jitterul în sisteme digitale



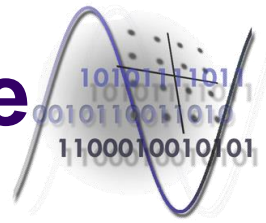
- Toleranța la jitter;
 - Valoarea maximă a jitterului pentru care nu apar decizii eronate;
 - Diferă în funcție de frecvența jitterului astfel:
 - la frecvențe joase ale jitterului este posibilă depășirea limitei de 1 UI fără apariția deciziilor eronate;
 - semnalul de tact recuperat preia aproape în întregime acest jitter, urmărind variațiile de fază lente ale semnalului recepționat și realizând o eșantionare corectă
 - sistemul poate tolera o variație de fază mai mare de 1 UI (chiar mult mai mare).
 - dispozitivele de recuperare a tactului au o caracteristică de transfer în domeniul frecvență de tip trece jos;
 - apar numai componente de jitter de frecvență joasă în semnalul regenerat.
 - la frecvențe mari ale jitterului, tactul recuperat (din semnalul digital) nu poate urmări jitterul
 - amplitudinea vârf-vârf a jitterului nu poate depăși 1 UI, fiind în realitate fracțiuni de UI.

Jitterul în sisteme digitale



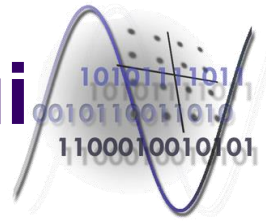
- Efectul jitterului și a wanderului constau în următoarele:
 - Se modifică (scade) rezerva transmisiunilor digitale la alte imperfecțiuni ale canalului (de ex. zgomot);
 - Depășirea unei limite duce la creșterea semnificativă a probabilității de eroare pe secțiunile digitale;
 - acest efect se reflectă în canalele vocale sub formă de zgomot de impulsuri și zgomot de fond.
 - Apariția 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 modulație parazită de poziție asupra impulsurilor cu modulație de amplitudine (PAM).

Jitterul în sistemele digitale



- Jitterul se poate clasifica în:
 - Variații sistematice;
 - variații de fază dependente de structura semnalului digital (variații dependente de diagramă – „pattern-dependent”);
 - aceste variații de fază apar datorită mai multor unități digitale identice conectate în tandem și corelate;
 - efectul este pronunțat cumulativ.
 - Variații nesistematice:
 - presupune absența corelației sau un grad de corelare redus a diverselor surse de jitter;
 - aceste variații de fază au un caracter stohastic (sau semistohastic) și nu depind de secvența de semnal digital (variații independente de diagramă – „pattern-independent”);
 - acest tip de jitter are o influență redusă asupra calității transmisiei;
 - efectul este slab cumulativ.

Originea jitterului

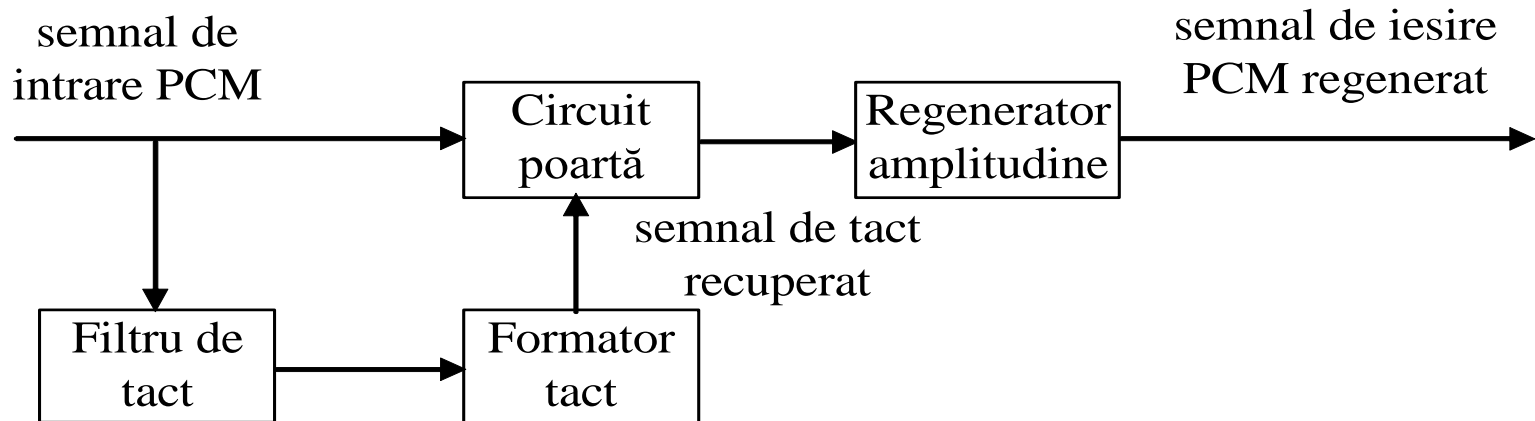


- Sursele de jitter cele mai reprezentative:

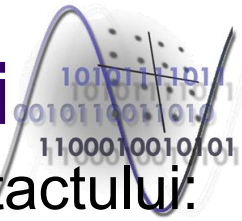
- **Regeneratorul digital:**

- un regenerator reface semnalul digital de la intrare cu ajutorul unui semnal de tact, extras din semnalul recepționat;
- datorită imperfecțiunilor de refacere a tactului, acesta conține o modulație de fază care este transmisă semnalului digital regenerat, sub formă de jitter;
- în procesul de regenerare fiecare regenerator distorsionează semnalul de tact și prin intermediul acestuia generează jitter în semnalul de la ieșire;
 - acest jitter se însumează cu jitterul generat de alte generatoare ale lanțului de transmisie.

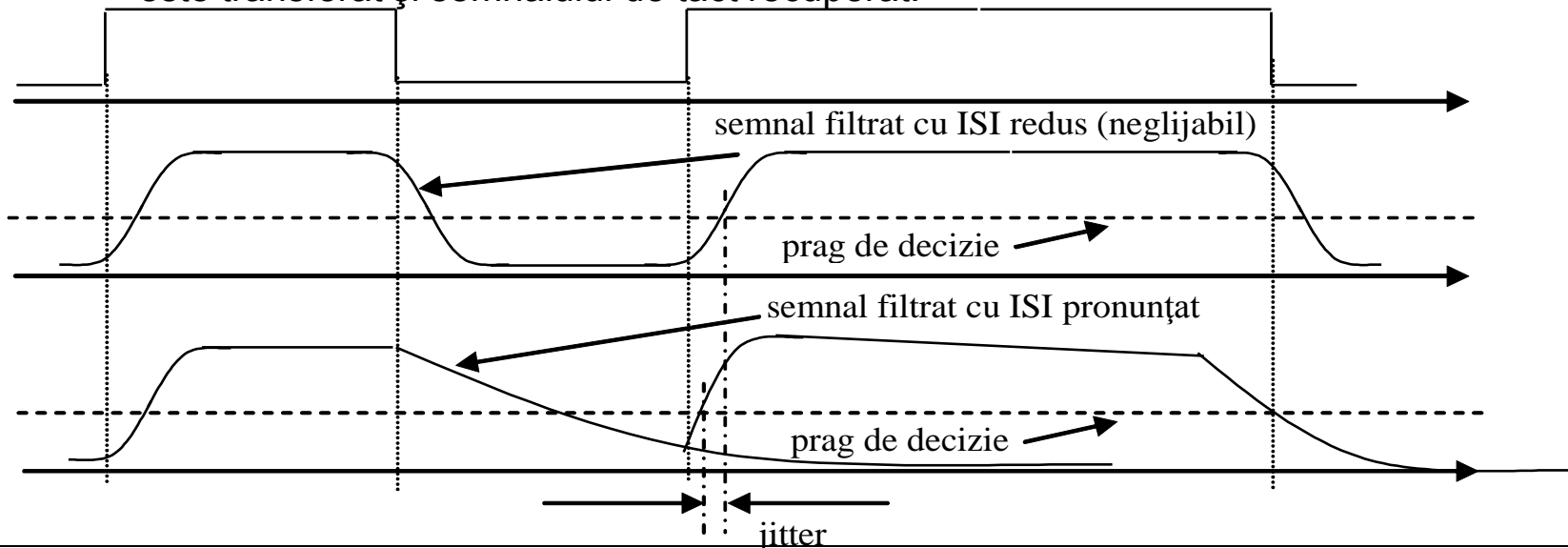
- **Ideea de bază a regenerării semnalelor digitale:**



Originea jitterului



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

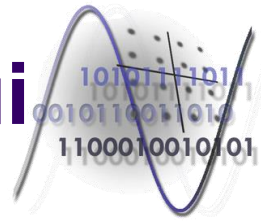


Originea jitterului

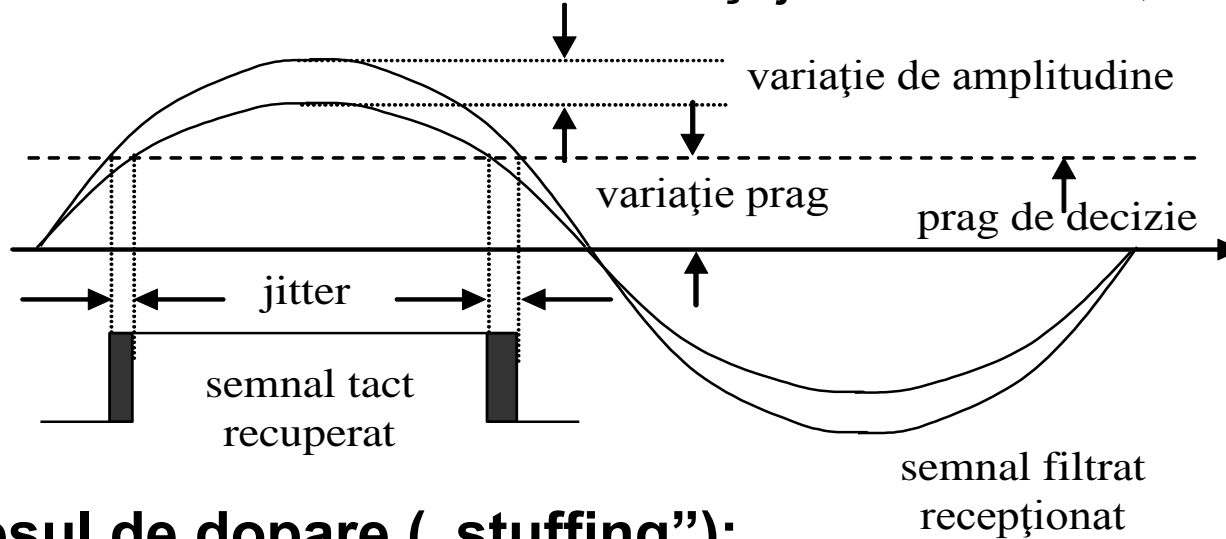


- Eroarea ΔF a frecvenței de rezonanță a circuitului de extragere a tactului;
 - dispozitivului de extragere a tactului se comportă ca un filtru de bandă îngustă acordat pe frecvența de tact;
 - în lipsa impulsurilor de sincronizare oscilațiile generate de circuitul de extragere se amortizează;
 - dacă există o diferență ΔF între frecvența circuitului acordat și frecvența de tact a semnalului recepționat 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 secvenței de semnal.
- Conversia $MA/M\Phi$;
 - este determinat de comparatorul de amplitudine din blocul de regenerare a impulsurilor (regeneratorul de amplitudine);
 - jitterul apare datorită modificării pragului de comparație și / sau a amplitudinii semnalului recepționat.

Originea jitterului



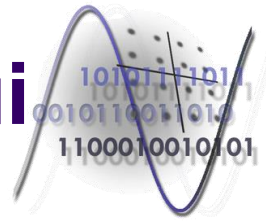
- Fenomenul de conversie MA/MΦ și jitterul asociat;



- Procesul de dopare („stuffing”);**

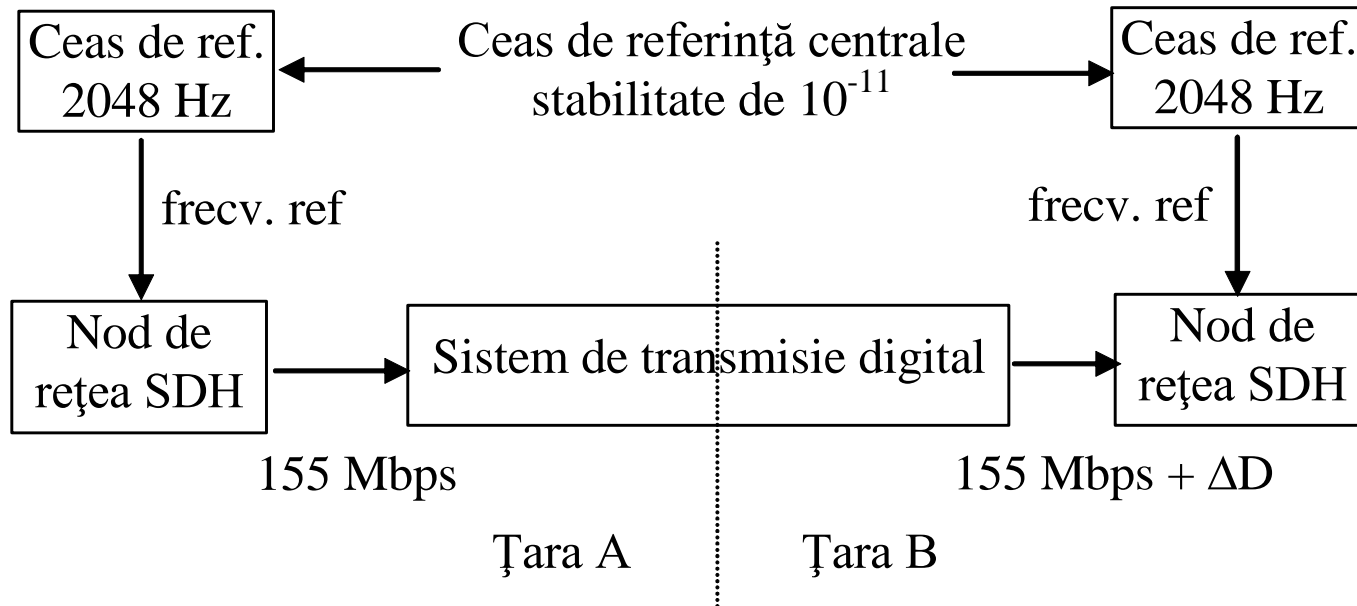
- jitterul asociat procesului de dopare apare la ieșirea echipamentelor de demultiplexare de ordin superior, atunci când procesul de multiplexare operează asupra mai multor afluenți plesiocroni;
- acest jitter este format din două componente de jitter:
 - jitterul de dopare: atunci când procesul de dopare apare imediat la cerere;
 - jitterul de așteptare: este definit ca și un jitter de joasă frecvență;
 - există în realitate un timp de așteptare între cererea de dopare și execuția acesteia.

Originea jitterului

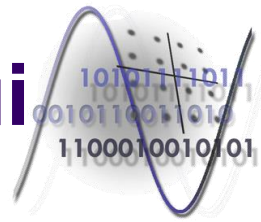


- **Wanderul;**

- Poate apare din mai multe motive cele mai importante fiind:
 - variația caracteristicilor mediului de transmisie;
 - variația generatoarelor de tact din nodurile rețelelor digitale.
- Apariție fenomenului de „wander”;



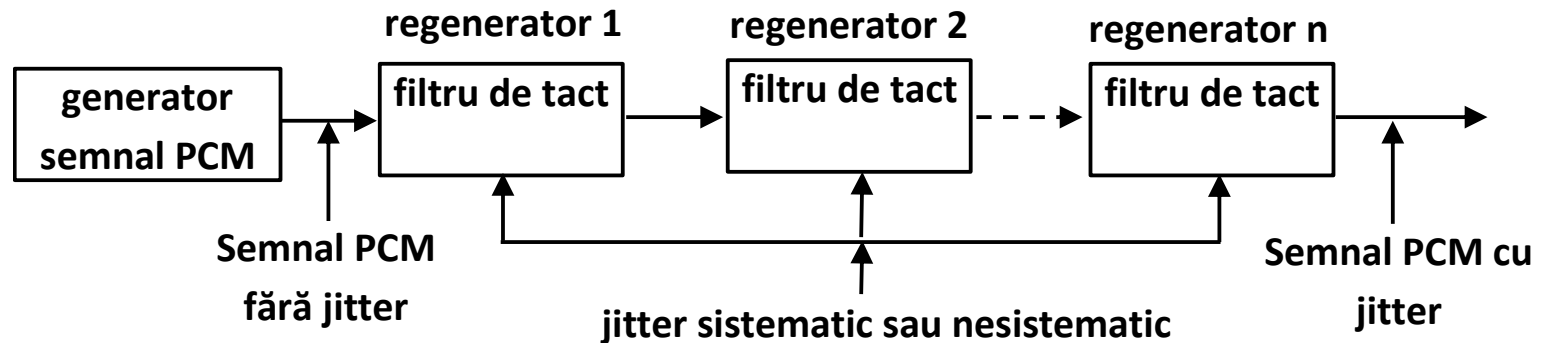
Acumularea jitterului



- Se consideră două situații posibile și anume:

- **1. Lanț de regeneratoare în cascadă:**

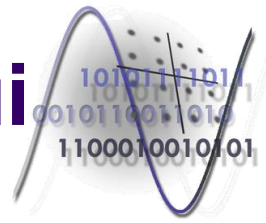
- caracterul jitterului este preponderent sistematic (dependent de secvența semnalului digital);
- cauza principală: imperfecțiunile circuitelor de recuperare a tactului;



- Acumularea jitterului aleator pe un lanț de regeneratoare cu surse de jitter necorelate:

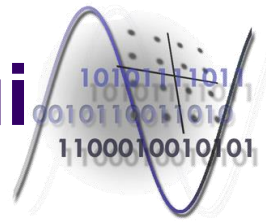
- legea de însumare este : $J_N = J_1 \cdot \sqrt[4]{N}$
- J_1 este valoarea eficace a jitterului generat de fiecare generator, J_N este valoarea eficace însumată;
- această situație are o importanță minoră în transmisiile digitale.

Acumularea jitterului



- Acumularea jitterului sistematic generat pe un lanț de regeneratoare cu surse de jitter corelate: dependente de secvența de biți;
 - 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 și de caracteristicile buclei PLL;
 - această situație are o importanță majoră în transmisiile digitale;
 - distribuție probabilistică a amplitudinilor jitterului acumulat apropiată de cea gaussiană;
 - un raport valoare vârf-vârf / valoare eficace de 12 – 15 este uzual și corespunde unei probabilități reduse de depășire a valorii de vârf.

Acumularea jitterului



- Acumularea jitterului în sisteme care conțin dispozitive scrambler/descrambler și dispozitive de reducere a jitterului;
 - În aceste sisteme regeneratoarele se comportă ca și 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 și 2 ($K=2$ pentru N mare), N numărul de sisteme digitale.
- **2. Echipamente de multiplexare – demultiplexare:**
 - apare o acumulare a jitterului de așteptare: $J_S \cdot \sqrt[4]{N} \leq J_M \leq J_S \cdot \sqrt{N}$
 - J_M : valoarea eficace a jitterului cumulat;
 - J_S : jitterul echipamentelor individuale;
 - N : numărul de echipamente de multiplexare.

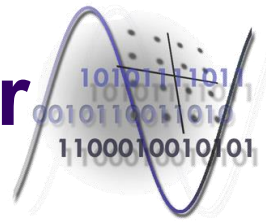
Performanțe de jitter



- Performanțe de jitter ale transmisiilor digitale cu diferite debite din rețelele de transmisie plesiocrone;
 - Performanțele se referă la limitele maxim admise pentru amplitudine jitter și pentru wander;
 - Limite impuse pentru amplitudine maximă jitter;

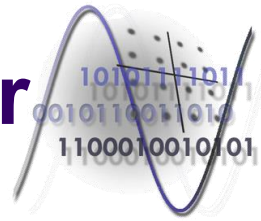
Tip jitter → Debit binar (kbps) ↓	Jitter măsurat în bandă largă		Jitter măsurat în bandă redusă	
	Valoare maximă vârf la vârf în UI	Bandă de frecvență de măsură	Valoare maximă vârf la vârf în UI	Bandă de frecvență de măsură
64	0,25	20Hz÷20kHz	0,05	3kHz÷20kHz
2048	1,5	20Hz÷100kHz	0,2	18kHz÷100kHz
8448	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

Performanțe de jitter

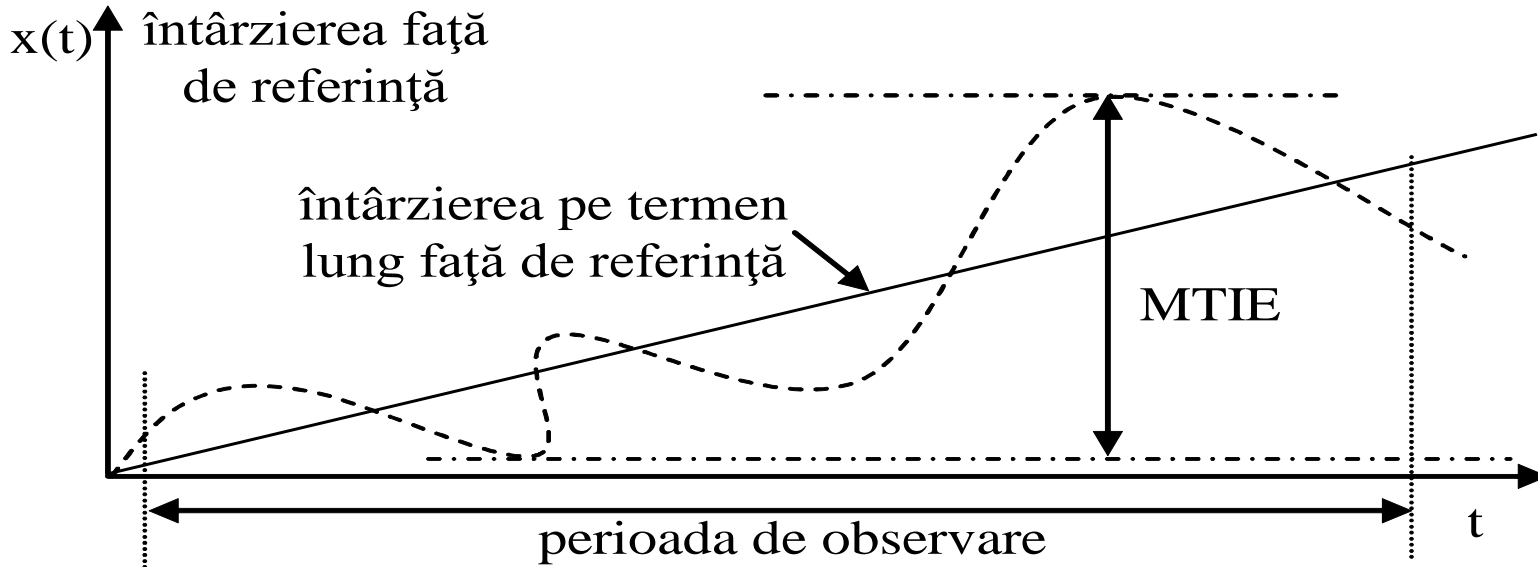


- Limitele pentru wander;
 - Wanderul este un fenomen lent determinat de:
 - caracteristicile mediului;
 - îmbătrânirea generatoarelor de tact;
 - Wanderul poate duce la fenomenul de alunecare;
 - se definește parametrul MTIE (“Maximum Time Interval Error”):
 - variația vârf la vârf a întârzierii semnalului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

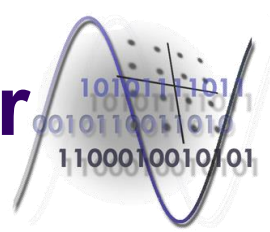
Performanțe de jitter



- Definirea parametrului MTIE asociat „wanderului”;

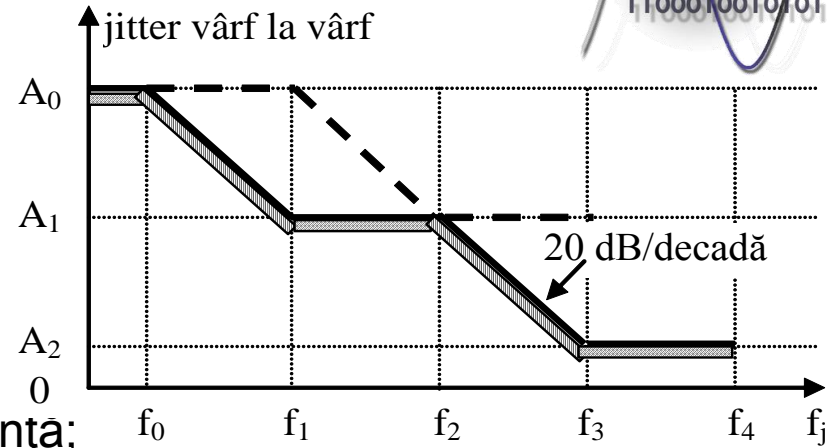


Performanțe de jitter



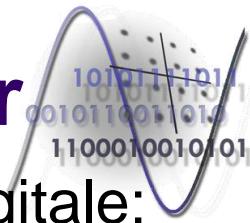
- Limite maxime admise ale valorii vârf la vârf ale jitterului și „wanderului” – toleranță la jitter și wander;

- Caracteristica jitter vârf la vârf – frecvența;

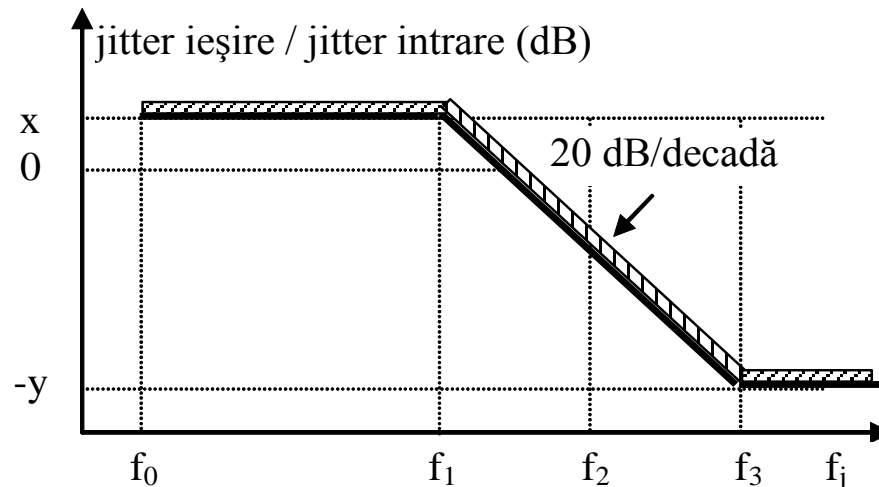


Valori param. →	Valoare vârf la vârf jitter (UI)			Frecvența (Hz)				
	A ₀	A ₁	A ₂	f ₀ (Hz)	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₃ (kHz)	f ₄ (kHz)
Debit binar (kbps) ↓								
64	1,15	0,25	0,05	$1,2 \times 10^{-5}$	20	600	3	20
2048	36,9	1,5	0,2	$1,2 \times 10^{-5}$	20	2400 (93)	18 (0.7)	100
8448	152	1,5	0,2	$1,2 \times 10^{-5}$	20	400 (10700)	3 (80)	400
34368		1,5	0,15		100	1000	10	800
139264		1,5	0,075		200	500	10	3500

Performanțe de jitter



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



- Jitterul maxim la ieșirea echipamentelor digitale;
- Jitterul maxim la ieșirea secțiunilor digitale.