

## PRINCIPIUL SISTEMELOR DE COMUNICAȚII CU SPECTRU DISTRIBUIT

### A. Modulația cu spectru distribuit

#### 1. Ce este spectrul distribuit?

Modulația / propagarea / transmisia cu spectru distribuit, toate se referă la același proces în care spectrul unui mesaj se distribuie pe o bandă de frecvență mai mare decât cea a semnalului original. Împrăștierea (distribuirea) se face tipic pe o lărgime de bandă de 20 până la 1000 de ori mai mare decât cea a semnalului original.

Spectrul distribuit se folosește în sistemele de navigație (GPS), de telefonie celulară, radare și în rețelele de calculatoare wireless (radio). Se cunoaște că această tehnologie este militară, dar a fost dezvoltată și pentru scopuri civile.

#### 2. Proprietățile spectrului distribuit.

##### a) Probabilitate mică de interceptare (PMI).

Densitatea spectrală de putere a semnalului emis este redusă până la un prag sub care este dificil pentru un receptor (care nu cunoaște secvența de distribuire) să detecteze prezența unei transmisii. Militarii sunt interesați de acest aspect (dar și celelalte tipuri de comunicații civile, care doresc protecție emisiei la accesările neautorizate), pentru a nu putea fi descoperiți că emit în spectrul radio.

##### b) Securitate / probabilitate mică de decodificare.

În plus față de distanța mică de detectare la care un ascultător neautorizat ar putea intercepta o transmisie, procesul de împrăștiere în sine adaugă securitate. Un dispozitiv de interceptare trebuie să știe secvența la recepție și sincronizarea pentru a fi capabil să găsească transmisia. În esență, aceasta e o formă de criptare.

##### c) Imunitatea la interferențe / rezistența la bruiaj.

Neplăcerile cauzate de un semnal de interferență, intenționat (bruiă) sau neintenționat (interferență) sunt reduse. Spectrul de putere de interferență este distribuit (împrăștiat) și astfel redus.

##### d) Transmiterea discretă a puterilor mari de emisie.

Spectrul distribuit dă posibilitatea transmiterii semnalelor de putere mare pe purtătoare cu densitate spectrală de putere mică (ex. un semnal radar de putere mare poate fi transmis fără să perturbeze toate aparatele radio din împrejurimi). Această proprietate este similară cu a) și inversă cu c)

##### e) Rejecția multical.

O legătură are traiectorii multiple când semnalul radio urmează căi cu diferite lungimi și ajunge la receptor sub formă de semnal util acompaniat de replici întârziate în timp (posibil și cu faze diferite). Spectrul distribuit (SD) presupune o rată de bit mai mare decât cea a mesajului original (de transmis) și astfel, biții, numiți *chip(s)*, sunt mai scurți ca și durată decât biții mesajului.

Dacă timpul de întârziere dintre unda directă și cea reflectată este mai mare decât durata unui chip, nu mai există corelație între codul recepționat și codul local al

receptorului sau unda reflectată rezultată în spectrul semnalului reflectat este împrăștiată și apare ca un spectru cu densitate de putere scăzută (interferența de putere foarte mică). Această proprietate poate fi utilizată, spre exemplu, la recepția semnalelor sateliților, unde unda directă este recepționată aproape în același timp cu reflexiile de la obiectele din jurul receptorului aflat la sol.

f) Multiplexarea.

### 3. Tipuri de SD

Există 2 tipuri de bază de SD:

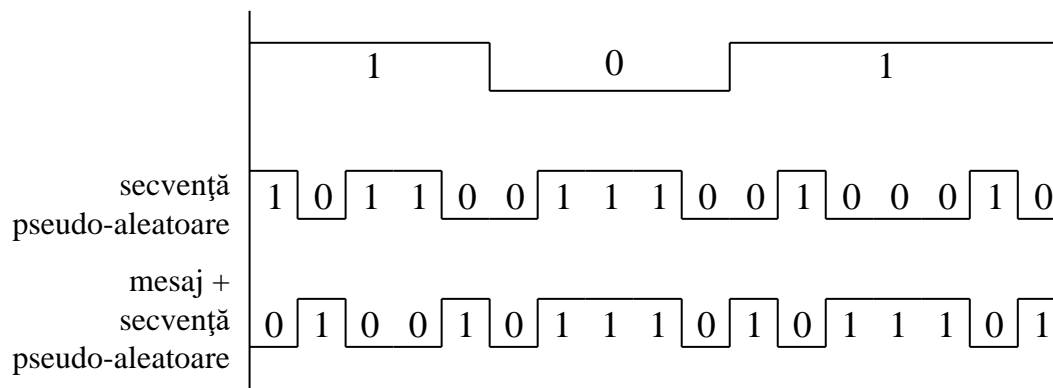
- primul tip utilizează o secvență directp rapidă, un cod pseudo-aleator, care împrăștie spectrul semnalului original (de transmis);

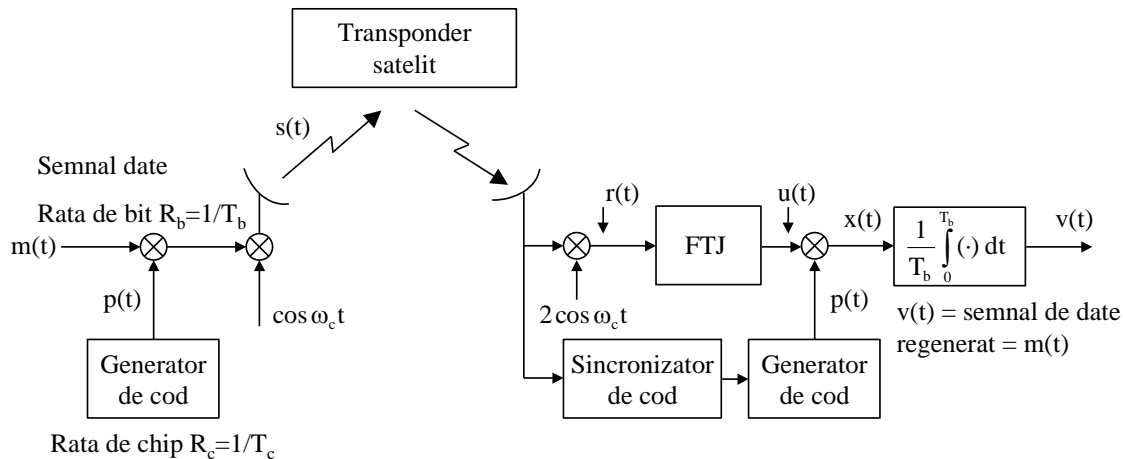
- SD cu salt de frecvență.

Mai există și combinația celor două tipuri (hibrid), în care semnalul este mai întâi împrăștiat de către procesul cu secvență directă, apoi se produce saltul în frecvență, pentru împrăștierea, mai departe, a mesajului.

### 4. Spectrul distribuit cu secvență directă (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum)

În DSSS, un mesaj digital  $m(t)$  se combină modulo-2 cu un cod  $p(t)$  (o secvență pseudo-aleatoare) în care rata de chip este mai mare decât cea a mesajului.





Mesajul original  $m(t)$  este feliat (cu rata de chip) rezultând un șir de date cu lărgimea de bandă mai mare (cea a codului  $p(t)$  = secvența pseudo-aleatoare)

După ce s-a adunat codul, semnalul este convertit la frecvența purtătoare, rezultând:

$$s(t) = m(t) \cdot p(t) \cdot \cos \omega_c t$$

La recepție, semnalul este demodulat coerent (în fază) prin multiplicarea semnalului recepționat cu o replică a purtătoarei. Semnalul  $r(t)$  de la intrarea FTJ (filtru trece-jos) detector este:

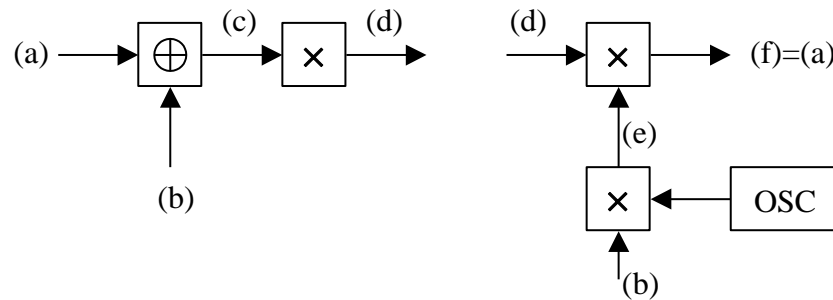
$$r(t) = m(t) \cdot p(t) \cdot \cos \omega_c t (2 \cos \omega_c t) = m(t) \cdot p(t) + m(t) \cdot p(t) \cdot \cos 2\omega_c t$$

FTJ detector elimină componentele de înaltă frecvență și reține doar componenta de joasă frecvență  $u(t) = m(t)p(t)$ . Această componentă este apoi multiplicată cu codul local  $p(t)$ , în fază cu codul recepționat. Produsul  $p^2(t) = 1$ . La ieșirea multiplicatorului rezultă:

$$x(t) = m(t) \cdot p(t) \cdot p(t) = m(t)$$

Semnalul este apoi integrat pe durata unui bit, pentru a filtra zgomotul. Mesajul inițial (cel emis) este reconstituit la ieșirea integratorului.

|    |   |  |
|----|---|--|
| a) | <u>0</u> <u>1</u>   | mesaj  |
| b) | <u>0 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 1</u>  | secvență pseudo-aleatoare                        |
| c) | <u>0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 0 0</u>  | mesaj + secvență pseudo-aleatoare                |
| d) | <u>0 0 0 <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> <math>\pi</math> 0 0 <math>\pi</math> <math>\pi</math> <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> 0 0</u> | faza purtătoarei                                 |
| e) | <u>0 0 0 <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> 0 0 0 <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> <math>\pi</math></u> | faza oscilatorului receptorului                  |
| f) | <u>- - - - - - - + + + + + + +</u>  | purtătoarea $\times$ oscilator receptor (faza)   |
| g) | <u>0 0 0 0 <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math> 0 0 0 <math>\pi</math> 0 <math>\pi</math></u>                | faza oscilator receptor, deplasată cu un slot    |
| h) | <u>- - - + + + - + - - + + - - +</u>  | purtătoarea $\times$ faza mutată a oscilatorului |



Făcând referire la figura de mai sus, considerăm o parte a unui mesaj digital, (a) și un cod pseudo-aleator mai rapid, (b). Suma modulo-2,  $(a) \oplus (b) = (c)$  se folosește pentru modularea unei purtătoare sinusoidale, utilizând modulația BPSK (în acest sistem simplu cu 2 faze, 1 și 0 sunt reprezentate de aceeași purtătoare, dar cu fază opusă). Faza purtătoarei modulate, relativ la o undă nemodulată, este dată de  $(d)$ =unda modulată care se transmite.

6. În receptor, o purtătoare similară este modulată PSK de către același cod pseudo-aleator folosit la emisie  $\Rightarrow$  (e) care se sincronizează cu unda ce sosește de la emițător. Dacă cele 2 unde sunt în fază, ieșirea este +1, în antifază  $\Rightarrow$  -1  $\Rightarrow$  (f) (mesajul reconstituit).

7. Codul cu viteză mare din receptor trebuie să fie sincronizat cu cel recepționat de la emițător. (g) reprezintă secvența pseudo-aleatoare (e) deplasată cu un slot de timp. Când se utilizează pentru demodularea formei de undă care sosește, (d), ieșirea este (h), o altă secvență pseudo-aleatoare.

#### 8. Factorul de împrăștiere / câștigul de procesare

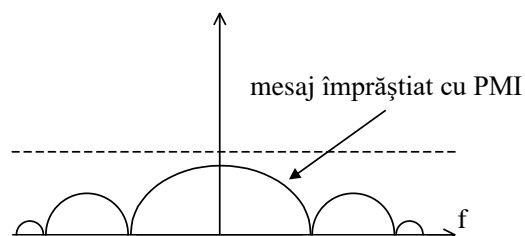
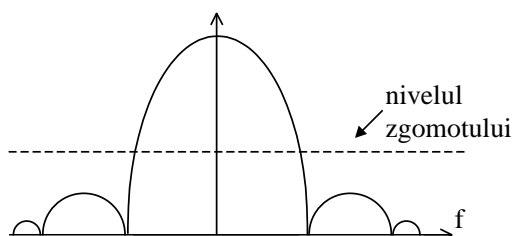
Mărimea caracteristică împrăstierii semnalului se numește factor de împrăștiere sau câștig de procesare. Reprezintă numărul de chips per bit și se măsoară în dB prin

$$10\log(\text{numărul de chips/bit}) \text{ sau}$$

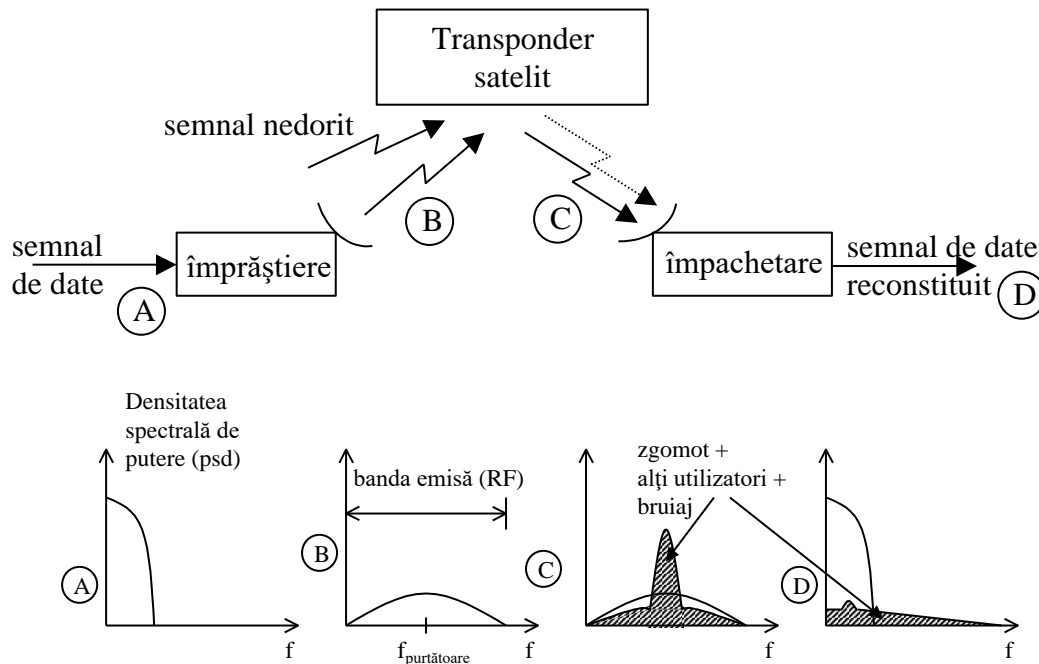
$$\text{câștigul de procesare} = 10\log[\text{rata de bit a codului} / \text{rata de bit a mesajului}]$$

Mărimea benzii de frecvență transmise este produsul dintre banda mesajului și factorul de împrăștiere.

a) PMI. Factorul de împrăștiere necesar depinde de aplicație, dar, dacă e necesară PMI, densitatea spectrală de putere (psd) ar trebuie redusă cât se poate, preferabil sub nivelul zgomotului ambiantal.



b) Anti-bruiă / suprimarea interferențelor. Considerăm un bruiă sau o sursă de interferență în lărgimea de bandă a receptorului cu spectru distribuit.

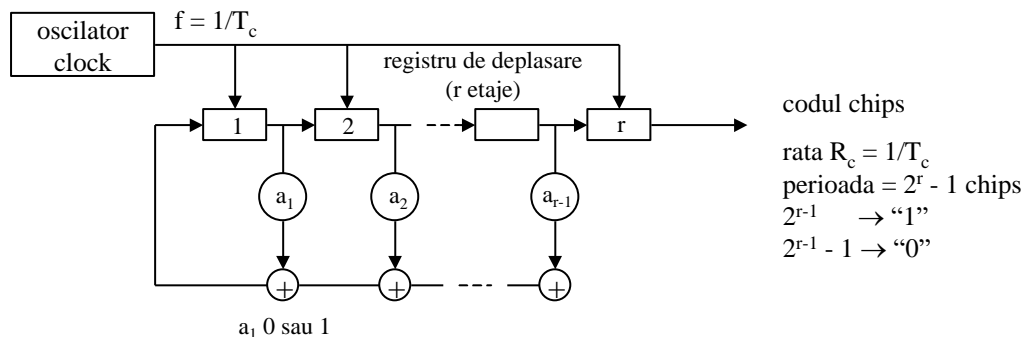


Codul receptorului împachetează mesajul și îl aduce în lărgimea de bandă a mesajului inițial, dar împrăștie interferența în acord cu raportul de împrăștiere. Raportul de împrăștiere este, deci, raportul anti-bruiă obținut sau câștigul de procesare reprezintă îmbunătățirea raportului semnal util / interferență.

Ar trebui precizat că spectrul distribuit nu îmbunătățește raportul semnal / zgomot (RSZ) (SNR – Signal to Noise Ratio) al zgomotului alb (cu spectru infinit), ci efectul de împrăștiere acționează doar pentru compensarea benzii mai mari a receptorului.

## 9. Codul pseudo-aleator

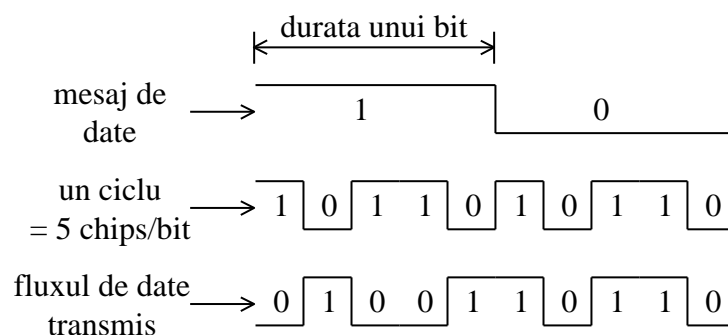
Codul este o secvență pseudo-aleatoare generată de un registru de deplasare cu reacție inversă. Secvența de ieșire se repetă la fiecare  $2^r - 1$  chips, unde  $r$  reprezintă numărul de etaje ale registrului de deplasare.



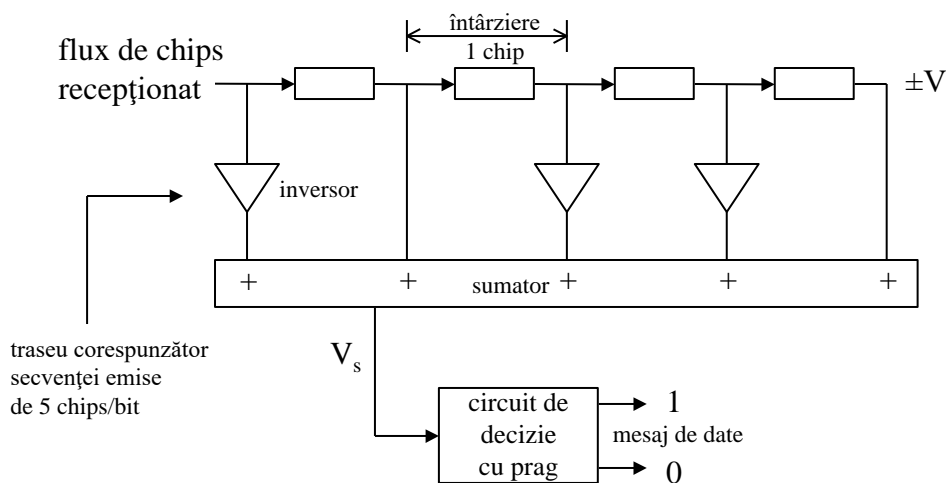
Deoarece spectrul rezultat este aproape uniform peste lărgimea de bandă ocupată, secvența este deseori denumită și secvență de pseudo-zgomot.

În plus față de cerința ca secvența de cod să aibă o statistică aparent aleatoare mai există și alte criterii. În medii în care există și alte sisteme cu spectru distribuit operaționale, este necesară o separare foarte bună între codurile pseudo-aleatoare (adică o corelație încrucișată foarte mică între coduri). În acest scop s-au creat “cataloge” cu “coduri de aur”, care au corelație aproape 0 între ele. Mai mult, fiecare cod trebuie să fie diferit față de replica sa deplasată în timp.

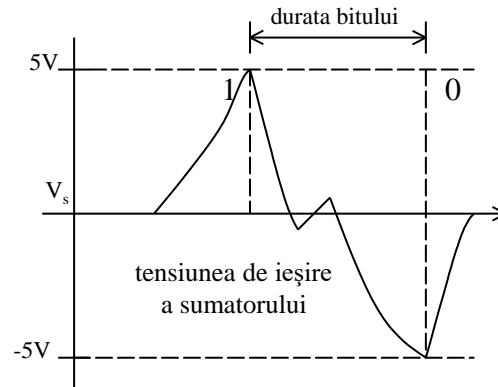
Figura de mai jos arată principiul receptorului corelator utilizat pentru extragerea mesajului din fluxul de chips recepționat.



### CODAREA

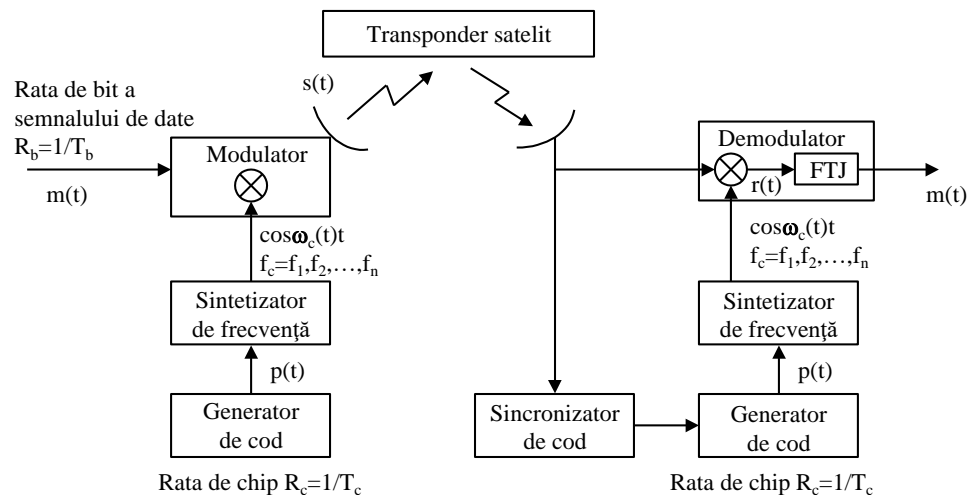


### DECODAREA



## 10. Spectru distribuit cu salt în frecvență (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum)

Spectrul unui mesaj care sare rapid de la o frecvență la alta utilizează efectiv o lărgime de bandă mai mare decât cea a mesajului original, deci, saltul în frecvență poate fi considerat o formă de transmisie cu spectru împrăștiat. Rata de salt utilizată în practică variază de la câteva salturi / secundă până la câteva mii de salturi / secundă. Saltul în frecvență se poate explica foarte bine și în cazul sistemelor analogice.



Mesajul binar  $m(t)$  se transmite cu rata  $R_b = 1/T_b$  și este codat NKZ (Non Return to Zero). El modulează o purtătoare de frecvență generată de un sintetizator PLL controlat de un generator de cod pseudo-aleator, ce lucrează la rata de chip  $R_c$ . Semnalul emis este

$$s(t) = m(t) \cos \omega_c(t)t$$

## 11. Factorul de împrăștiere

Banda totală a sistemului cu salt în frecvență este

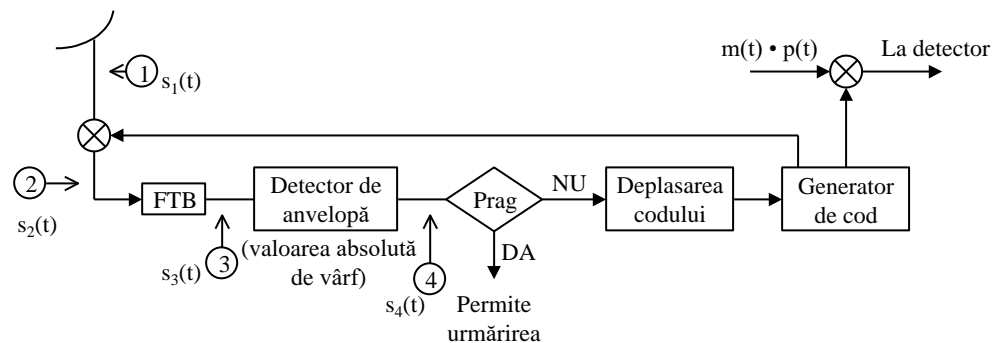
$$\text{banda mesajului} \times \text{numărul de canale}$$

Aceasta presupune că există suficient spațiu de gardă în canalul mesajului, pentru a evita interferența dintre canalele adiacente. Acest lucru devine important când se operează în prezența altor sisteme cu salt în frecvență.

## 12. Sincronizarea

Sincronizarea generatorului de secvență pseudo-aleatoare din receptor cu fluxul de date pseudo-aleatoare sosite este esențială pentru recuperarea mesajului original. Sincronizarea constă în 2 etape: achiziția secvenței și urmărirea.

### a. Achiziția secvenței



În esență, se face o estimare (ghicire) a punctului atins în secvența de cod pseudo-aleatoare. Secvența receptorului este setată după această poziție estimată. Estimarea punctului atins de secvența pseudo-aleatoare se face din cunoașterea duratei în care codul a funcționat.

Receptorul acum încearcă să decodeze fluxul de date de intrare și presupunând că nu este poziționat în punctul corect, la ieșirea receptorului va fi zgomot.

Secvența receptorului va fi avansată bit cu bit până când valoarea de la ieșirea receptorului se ridică peste zgomot și peste un anumit prag setat. Receptorul ar trebui să fie în punctul corect al secvenței, totuși posibil nesincronizat exact pe mijlocul fiecărui bit din fluxul de date. Acest lucru intră în responsabilitatea circuitului de urmărire.

În figura de mai sus,  $s_1(t)$  este codul pseudo-aleator generat local,  $s_2(t)$  reprezintă ieșirea demodulatorului coerent (care va fi zgomot până la sincronizarea corectă).  $s_3(t)$  este ieșirea filtrului trece-bandă (FTB) care are bandă egală cu cea a mesajului.  $s_3(t)$  constituie intrarea pentru un detector de anvelopă, ce acționează ca un corelator, dând ieșire semnificativă ( $s_4(t)$ ) doar când este obținută sincronizarea.

### b. circuitul de urmărire a secvenței.

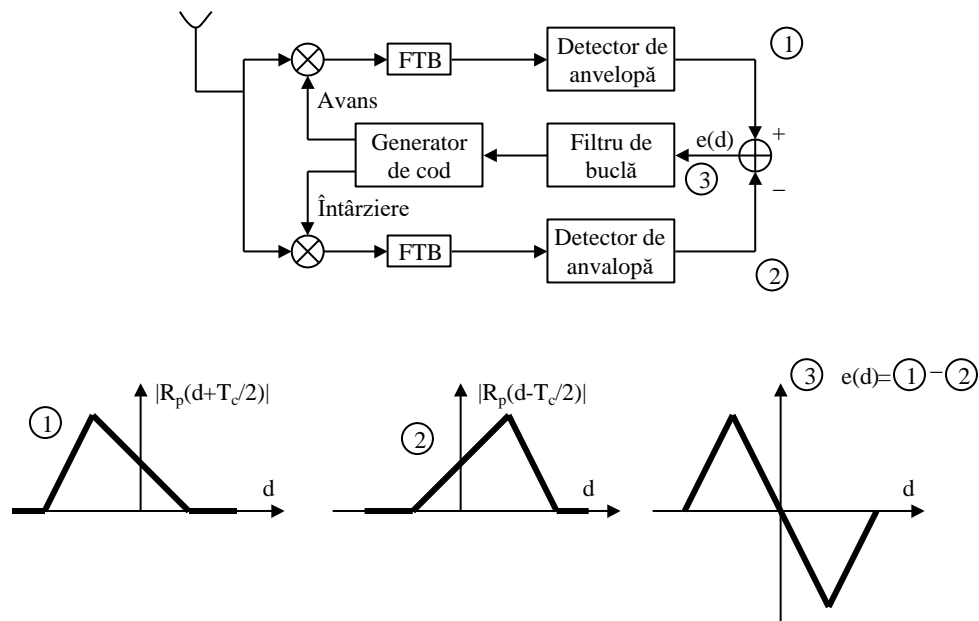
După ce s-a obținut sincronizarea brută, este problema circuitului de urmărire să găsească punctul de mijloc al fiecărui bit din mesajul de date recepționat și să mențină corect fluxul de date (figura următoare).

Codul pseudo-aleator generat local se divide pe 2 căi, una dintre ele fiind în față cu  $\frac{1}{2}$  bit, iar cealaltă întârziată cu  $\frac{1}{2}$  bit.

Dacă secvența pseudo-aleatoare este centrată pe fluxul de date recepționat, atunci ieșirile celor 2 căi sunt egale. Căile se însumează, iar ieșirea se utilizează ca reacție



pentru avansarea sau întârzierea fluxului de date. Dacă ieșirea este 0, nu există deplasare a fluxului de date. Când ieșirea sumatorului este diferită de 0 se face deplasarea potrivită  $\pm$ .



### 13. Metoda hibridă cu spectru distribuit

Pentru a crește factorul de împrăștiere se folosește o metodă hibridă, care combină DSSS cu FHSS.

Mărimea spectrului împrăștiat care poate fi obținută prin DS sau FH singure este limitată de rata la care poate fi generată secvența. Ca o consecință, pentru creșterea împrăștierii trebuie combinate cele 2 metode. Întâi se utilizează un cod DS pseudo-aleator, apoi se adaugă secvența de salt.

$$\text{Factorul total} = \text{Factorul de împrăștiere DS} \times \text{Factorul de împrăștiere FH}$$

14. În CDMA (Code Division Multiple Access), mesajele sunt transmise în aceeași bandă, în același timp. Separarea se obține prin “împrimarea” mesajelor pe secvențele pseudo-aleatoare. Fiecare mesaj este combinat cu o secvență proprie, orice 2 secvențe având corelație încrucișată 0, ideal, dar practic cât mai mică posibil.

### 15. Eficiența spectrală

Se definește  $\Gamma$  ca raportul dintre capacitatea  $R_c$  (bit/sec) a unei purtătoare și banda ocupată  $B$  (Hz)

$$\Gamma = \frac{R_c}{B}$$

$$\Gamma_{\text{PSK}} \cong 0,8 ; \Gamma_{\text{QPSK}} \cong 1,6 ; \Gamma_{\text{CDMA}} \cong 0,1$$

## 16. Numărul maxim de accesări

Considerăm cazul unui sistem DS-CDMA în care toate  $N$  purtătoarele au puterea egală  $C$ .

- Rata informației =  $R_b$
- Energia pe bitul de informație =  $E_b = C/R_b$
- Pseudo-zgomot la receptor =  $N_0 = (N-1)C/B_N$ , unde  $B_N$  este banda echivalentă de zgomot a receptorului

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B_N}{R_b(N-1)} = \frac{R_c}{R_b(N-1)\Gamma}$$

Cum calitatea unei legături este stipulată de o rată de eroare dată, valoarea  $E_b/N_0$  este impusă. Din aceasta se deduce numărul maxim de accesări.

$$N_{\max} = 1 + \frac{R_c}{R_b} \Gamma \frac{E_b}{N_0}$$

Capacitatea maximă totală a rețelei este  $N_{\max} \cdot R_b$