

Tehnica de transmisie cu spectru împrăștiat prin salt de frecvență (Frequency-Hopped Spread-Spectrum – FH-SS)

- semnalul modulat FH-SS poate fi privit ca un semnal modulat de bandă îngustă transmis pe o purtătoare a cărei frecvență se schimbă la intervale constante de timp, luând valori dintr-un set finit de valori posibile numit „hopset”.
- lărgimea de bandă LB_c a semnalului transmis pe un canal al FH-SS rămâne constantă, în timp ce frecvența sa purtătoare se modifică în timp.
- salturile de frecvență sunt utilizate într-un sistem de transmisie a cărui bandă de frecvență este împărțite într-un număr finit de canale (sub-benzi), fiecare canal având o lărgime de bandă LB_c suficientă pentru a cuprinde spectrul util al semnalului modulat (FSK sau QAM).
- lărgimea de bandă a unui canal se numește lărgime de bandă instantanee, iar lărgimea de bandă W_{ss} în care au loc salturile de frecvență, se numește lărgimea totală de salt (total hopping BW)
- un semnal util este transmis pe fiecare canal sub forma unor salve scurte, transmisia sa fiind compusă din succesiunea acestor salve care sunt transmise pe frecvențe purtătoare diferite f_{pj} .
- mulțimea frecvențelor purtătoare utilizate f_c formează hopping setul.
- durata unei salve, adică durata cât se transmite pe o anumită frecvență purtătoare, se numește durata saltului T_h și este inversa frecvenței de salt f_h , $T_h=1/f_h$.
- expresia câștigului de procesare în cazul FH-SS este egală cu: $PG = W_{ss} / LB_c$ (1)
- transmisia pe frecvență purtătoare variabilă f_{pj} se realizează prin modularea pe o frecvență intermediară f_i , urmată de o translație în frecvență care folosește o frecvență de translație egală cu:

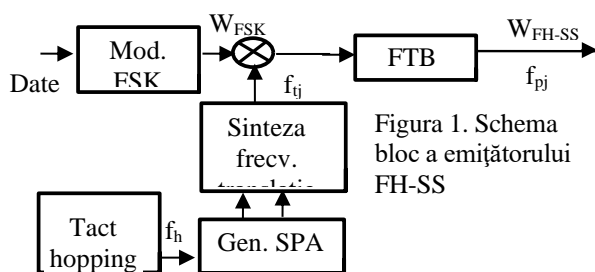


Figura 1. Schema bloc a emițătorului FH-SS

$$f_{ij} = |f_{pj} - f_i| \quad (2)$$

unde f_{pj} este o frecvență din hoppingset, iar f_{ij} este frecvența de translație corespunzătoare ei.

- frecvențele f_{ij} sunt utilizate în ordinea dată de o Secvență Pseudo-Aleatoare (SPA) specifică, fiecare f_{cj} fiind utilizată un interval de timp T_h
- schema bloc a modulatorului FH-SS este prezentată în figura 1.
- la recepție semnalul este mai întâi filtrat TB (cu $LB = W_{ss}$) și apoi translatat de pe frecvența purtătoare instantanee pe o frecvență intermediară constantă („dehopping”) folosind un oscilator care generează frecvențele de translație f_{ij} în mod sincron cu generatorul acestor frecvențe de la emisie.
- semnalul local cu frecvența f_{ij} este generat folosind un generator SPA și un bloc de sinteză digitală a semnalului cu frecvența f_{ij} ;
- generatorul SPA, identic cu cel de la emisie, furnizează indexul j al frecvenței de translație f_{ij} în aceeași ordine cu cea de la emisie și în ritmul tactului de salt f_h furnizat de un circuit de sincronizare al tactului de salt local cu cel de la emisie; astfel se asigură utilizare frecvențelor f_{ij} în aceeași ordine și în aceleași intervale de timp cu cele de la emisie.
- apoi semnalul axat pe f_i este filtrat TB cu un filtru cu lărgimea de bandă LB_c și $f_0 = f_i$, iar în final este demodulat în conformitate cu modulația utilizată, FSK sau QAM.

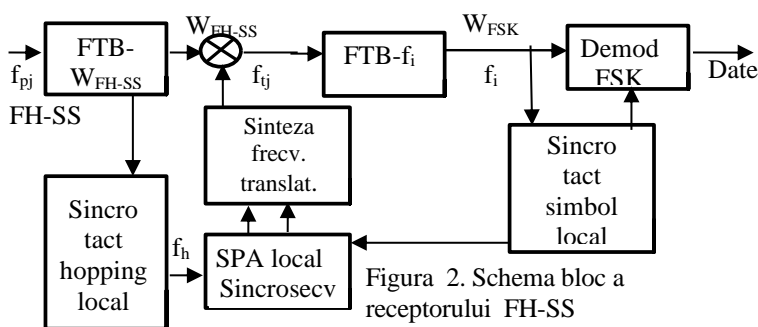


Figura 2. Schema bloc a receptorului FH-SS

- schema bloc principală a receptorului FH-SS este prezentată în fig. 2.

- modificarea frecvenței purtătoare prin salt poate fi lentă sau rapidă („fast or slow frequency hopping”).
- „fast frequency hopping” apare dacă $f_h > f_s$ (frecvența de simbol a transmisiei); în acest caz nu se pot utiliza demodulatoare coerente deoarece un simbol este transmis pe mai multe frecvențe purtătoare, ceea ce face dificilă utilizarea modulațiilor PSK și A+PSK. Se utilizează modulații de tip FSK, care permit și modulare-demodulare necoerentă.
- „slow frequency hopping” apare dacă $f_h < f_s$; în acest caz pe o frecvență se transmite un grup de biți. Se pot utiliza demodulatoare coerente și deci se pot utiliza și modulațiile PSK și A+PSK.
- saltul în frecvență este utilizat atât pentru a asigura diversitate transmisiei, fapt ce poate îmbunătăți calitatea transmisiei utilizatorilor statici, cât și pentru asigurarea securității transmisiei, secvența

după care se modifică frecvențele purtătoare făcând parte din mecanismul de criptare a transmisiei.

Performanțe de SINR ale FH-SS

- în sistemele ce utilizează FH-SS (cu acces multiplu) semnalului emis de un utilizator către stația de bază i se adună următoarele semnale interferente și de zgomot:

- semnalele interferente în aceeași bandă de frecvențe (lărgime de bandă LB_c și frecvență purtătoare f_{pj}) emise de alți utilizatori din alte celule care folosesc aceeași frecvență purtătoare (Co-Channel Interference - CCI).
- lobii spectrali laterali ai semnalelor emise de utilizatori ce transmit pe frecvențele purtătoare învecinate (Adjacent Channel Interference - ACI)
- zgomotul de fond (gaussian)

- la recepție trebuie considerat că semnalul este afectat de suma dintre interferențe ACI și zgomot, rezultând raportul SINR (Signal to Noise+Interference Ratio), notat cu ρ_{IN} în exprimare liniară.

- pentru a evalua performanțele FH-SS, considerăm că se folosește o modulație de tip 2-FSK cu demodulare necoerentă, a cărei probabilitate de eroare de bit în funcție de SINR este dată de expresia:

$$BER = 0,5 \cdot \exp(-\rho_{IN} / 2); \rho_{IN} = 10^{(SINR/10)} \quad (3)$$

- de asemenea vom considera că secvențele de hopping ale semnalului util și celui interferent CCI sunt sincronizate în timp, adică perioadele T_h se suprapun („slotted frequency hopping - salt în frecvență sincronizat)

- dacă pe durata T_h la BS ajung semnalele de la doi utilizatori care folosesc frecvența f_{pj} (unul autorizat, altul interferent în celula respectivă), adică apare CCI, atunci are loc o coliziune („hit”), eveniment ce are probabilitatea p_c .

- deoarece biții transmiși de cei doi utilizatori pot fi diferiți cu o probabilitate egală cu 0,5, în teorie se arată că probabilitatea de eroare de bit a transmisiei utilizatorului autorizat este:

$$BER = 0,5 \cdot e^{-\frac{\rho_{IN}}{2}} \cdot (1 - p_c) + 0,5 \cdot p_c \quad (4)$$

- dacă avem M frecvențe purtătoare permise pentru hopping iar lungimea SPA care dictează succesiunea frecvențelor purtătoare e egală cu M , rezultă că un semnal interferent (un utilizator neautorizat, CCI) cu nivel al puterii suficient de puternic pentru a afecta transmisia autorizată va afecta canalul pe care transmite utilizatorul autorizat cu o probabilitate $1/M$.

- dacă lungimea secvenței e mai mare de M atunci calculul acestei probabilități e mai complex și depășește cadrul prezentului material.

- dacă vom considera că există $T-1$ semnale interferente atunci probabilitatea ca cel puțin unul dintre acestea să afecteze transmisia autorizată, adică să avem o coliziune, este dată în (5). Ea poate fi aproximată cu a doua expresie din (5) pentru M mare și $M \geq T$.

$$p_c = 1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{T-1} \approx \frac{T-1}{M}; \quad (5)$$

- substituind (5) în (4) obținem probabilitate de eroare de bit a transmisiei afectate de coliziuni, interferențe și zgomot gaussian:

$$BER \approx 0,5 \cdot e^{-\frac{\rho_{IN}}{2}} \cdot \left(1 - \frac{T-1}{M}\right) + 0,5 \cdot \frac{T-1}{M} \quad (6)$$

- dacă vom considera cazul în care $T=1$, adică pe canalul respectiv transmite doar utilizatorul autorizat, se obține relația (3), adică probabilitatea de eroare de bit a unei transmisii afectate doar de ACI și zgomotul gaussian.

- folosind notațiile din (7) raportul ρ_{IN} poate fi exprimat în cazul transmisiilor FH-SS sub forma:

$$\text{daca } \rho_I = \frac{P_r}{P_I}; \rho_Z = \frac{P_r}{P_Z} \Rightarrow \rho_{IN} = \frac{P_r}{P_I + P_Z} = \rho_I \frac{\rho_Z}{\rho_I + \rho_Z} \leq \rho_I = \lim_{\rho_Z \rightarrow \infty} \rho_{IN} = \rho_{IN-f} \quad (7)$$

- relația (7) arată că și în acest caz raportul semnal util/(semnale interferente + zgomot) este limitat superior de valoarea raportului semnal util/semnale interferente („floor”), având valoarea maximă ρ_{IN-f} .

- dacă vom considera că $\rho_Z \rightarrow \infty$, adică SNR e foarte mare, atunci BER va tinde la:

$$BER \geq \lim_{\rho_Z \rightarrow \infty} BER \approx 0,5 \cdot e^{-\frac{\rho_I}{2}} \cdot \left(1 - \frac{T-1}{M}\right) + 0,5 \cdot \frac{T-1}{M} \geq 0,5 \cdot \frac{T-1}{M} = BER_f; \quad (8)$$

- relația (8) arată că în prezența a T utilizatori care transmit simultan pe aceeași f_{pj} și se află la distanțe relativ mici (CCI), și în prezența ACI, probabilitatea de eroare de bit (simbol) este limitată

inferior la valoarea BER_f („error-floor”), valoare care depinde de numărul de utilizatori care sunt recepționați simultan în același canal (în mod autorizat sau nu, în mediul dat), în ipoteza că numărul de canale pe care se face hoppingul este constant.

- dacă numărul utilizatorilor T din sistem (nu din celulă sau sector!) este mai mare decât numărul secvențelor de hopare (salt) disponibile atunci cel puțin doi utilizatori vor folosi aceeași succesiune de f_{pj} , cel puțin o perioadă de timp; acest fapt impune ca cei doi utilizatori să se afle la distanță suficient de mare a. î. valoarea interferențelor mutuale (CCI) să fie redusă semnificativ de atenuarea în spațiu liber. Evaluarea performanțelor de SINR în aceste cazuri trebuie să țină cont de particularitățile scenariului respectiv

- relațiile și considerentele de mai sus arată că fără o planificare atentă a reutilizării frecvențelor, care să reducă CCI prin asigurarea unei distanțe suficiente de mari între zonele în care acestea sunt utilizate, adică să asigure un nivel foarte mic al sumei semnalelor interferente pe aceeași f_{pj} (considerând atât nivelul interferenței de la un utilizator cât și al numărului de utilizatori care interferează), și în absența unor filtre care să atenueze corespunzător lobi spectrali laterali (interferențele de pe canalele adiacente) pentru a reduce ACI, valoarea BER a FH-SS este limitată inferior la o valoare mare, pentru reducerea căreia sunt necesare coduri corectoare de erori.

- calculele estimative de mai sus sunt făcute în ipoteza ca semnalele de tact folosite la „hoparea” semnalului util și a celor interferente sunt sincronizate.

- în multe sisteme practice aceste frecvențe nu sunt sincronizate, și în acest caz valoarea BER este limitată inferior la o valoare mai mare decât cea dată de relațiile (6) și (8).

- calcule similare pot fi făcute și pentru cazul utilizării modulațiilor GMSK, DPSK sau A+PSK, dar fenomenul de limitare inferioară a BER datorită interferențelor este prezent și în aceste cazuri.

Avantaje și dezavantaje ale modulației FH-SS

Avantaje:

- tehnica FH-SS asigură o mediere a valorilor SINR, asigurate unui utilizator în banda instantanee, pe canale radio selective în frecvență (cu propagare multicanal); acest fapt este util în special utilizatorilor staționari.

- tehnica FH-SS este mai puțin sensibilă la efectul „near-far” decât technique DS-SS, și nu necesită un control al puterii emise atât de riguros ca și DS-SS.

- tehnica FH-SS permite folosirea adaptivă în mod independent a constelațiilor QAM pentru fiecare utilizator autorizat, în funcție de starea canalului și de nivelul interferențelor, deoarece fiecărui utilizator autorizat i se atribuie o frecvență purtătoare (canal) distinctă din set.

Dezavantaje

- tehnica FH-SS nu permite mărirea numărului de utilizatori cu prețul scăderii calității transmisiilor, deci nu are proprietatea de „soft-capacity” - vezi cursul de DS-SS. Alocarea aceleași f_{pj} mai multor utilizatori în aceeași celulă (sector) ar conduce la creșterea semnificativă a probabilității de coliziune și deci la înrăutățirea semnificativă (și nu graduală) a calității transmisiei.

- tehnica FH-SS necesită o sincronizare a semnalelor de tact de hopare, pentru a reduce într-o oarecare măsură valoarea limită inferioară („error-floor”) a BER, datorată semnalelor interferente

- ea nu are proprietatea de a reduce puterea semnalelor interferente de bandă îngustă, ca și DS-SS; dacă aceste semnale apar numai pe o frecvență f_{pj} , atunci efectul lor se manifestă doar o perioadă T_h , ducând doar apariția unor pachete de erori de scurtă durată, care pot fi compensate de codurile corectoare de erori, iar pentru unele tipuri de servicii, cum ar fi telefonica, nu afectează semnificativ calitatea semnalului furnizat utilizatorului.

Aplicații ale FH-SS

- în transmisiunile militare atât pentru secretizarea transmisiei cât și pentru mărirea imunității la bruijaj (jamming)

- în sistemele celulare GSM pentru asigurarea unui nivel mediu suficient de mare al semnalului recepționat utilizatorilor statici precum și pentru secretizarea transmisiei

- în o variantă a sistemului Bluetooth există posibilitatea de a utiliza Adaptive FH; această metodă implică saltul pe frecvențele din set care nu sunt afectate semnificativ de interferențele co-utilizatorilor. Metoda are însă o complexitate ridicată și este destinată doar transmisiunilor cu rază mică de acoperire.

- în sistemele WiFi 802.11 b, g și n. În unele variante există posibilitatea ca pe legatura UT-AP să fie utilizate succesiv, cf. unei SPA, subbenzile de frecvență (canalele) din banda de 2.4 GHz pentru a micșora probabilitatea de apariție a coliziunilor.