

8. Considerații privitoare la egalizarea canalului în sistemele OFDM

- Egalizarea canalului poate fi realizată atât în domeniul timp cât și în domeniul frecvență
 - Egalizarea în domeniul frecvență, mai ușor de realizat în OFDM datorită FFT realizată implicit, poate fi de mai multe tipuri:

- Egalizare pe ton (PTE)
- Zero Forcing (ZF)
- Minimum Mean Squared Error(MMSE)

Egalizarea în domeniul timp

- Sarcina egalizorului în domeniul timp (*TEQ – Time Domain Equalizer*) este de a scurta durata răspunsului la impuls al canalului astfel încât lungimea acestuia să fie mai mică sau egală cu lungimea intervalului de gardă. Aceasta pentru a asigura eliminarea ISI care apare datorită propagării multicale pe căile de propagare cu întârzieri mai mari decât $M \cdot T_e$; aceasta face ca să nu fie necesară extinderea intervalului de gardă.

- Această operație este mult mai ușor de implementat decât o eventuală eliminare a interferenței intersimbol
 - Egalizorul este de fapt o linie de întârziere cu 10 până la 64 coeficienți (similară unui filtru FIR), putând fi privit ca un filtru adaptiv, care modifică adaptiv coeficienții unui filtru FIR pentru a anula amplitudinile impulsurilor ce apar la $t > M \cdot T_e$
 - Egalizarea în domeniul timp nu face obiectul acestui curs

Egalizare pe ton(PTE)

- Este similară cu TEQ, dar acționează asupra fiecărei subpurtătoare după trecerea în domeniul frecvență (FFT);

- inserarea egalizorului în scheme bloc a receptorului este prezentată în Fig. 18.

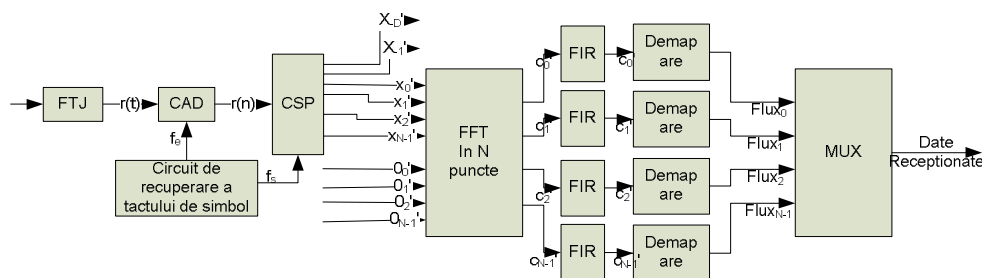


Fig. 18. Egalizare per ton (PTE)

- Se calculează (măsoară, folosind simbolurile pilot) efectul canalului pe fiecare subpurtătoare, coeficienții $h_k(iT_s)$, și se corectează efectul canalului pe fiecare subpurtătoare cu ajutorul unui filtru FIR cu lungime variabilă.
 - este complicat de implementat la sisteme cu N mare

Egalizare “Zero Forcing”(ZF)

- Semnalul recepționat pe subpurtătoarea k pe o perioadă de simbol este exprimat în (48), în care în coeficientul canalului se includ și efectele recuperărilor incorecte ale frecvențelor purtătoare și de eșantionare:

$$c_k = h_k \cdot c_k + z_k \quad (48)$$

- Egalizorul ZF “forțează” anularea efectelor introduse de canal conform ecuației:

$$c_{k-ZF} = \frac{c_k}{h_k} = c_k + \frac{z_k}{h_k} \quad (49)$$

- din ecuația (49) rezultă că egalizarea ZF amplifică nivelul zgomotului (în al doilea termen coeficientul h_k are modul subunitar)
 - prelucrările se realizează în paralel pentru toate cele N ieșiri ale FFT; o discuție mai detaliată asupra egalizării după principiul „ZF” depășește cadrul cursului de față
 - inserarea egalizorului „ZF” în receptor este prezentată în Fig. 19.

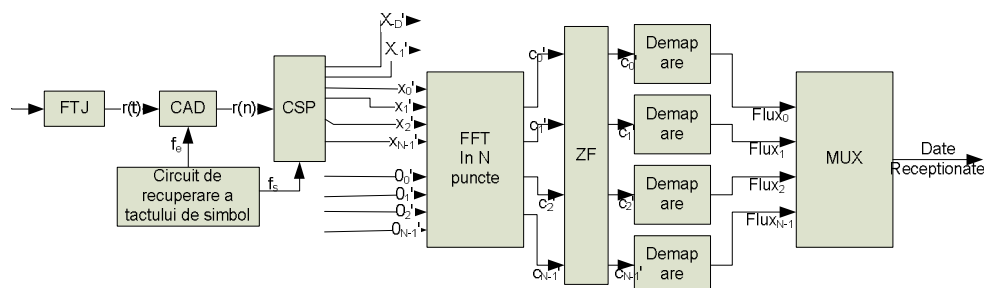


Fig. 19. Egalizare „Zero Forcing” (ZFE)
 Notă: blocurile de demapare includ și funcția de decizie a fazorului recepționat

Egalizare” Minimum Mean Squared Error” (MMSE)

- Egalizorul care lucrează după acest principiu minimizează puterea medie a semnalului de eroare, definit de (. 50), dintre simbolul recepționat c_k' furnizat de IFFT, (. 44), și simbolul transmis c_k :

$$e_k(n) = c_k' - c_k = c_k h_k + z_k - c_k \quad (. 50)$$

- Valoarea simbolului c_k' , după egalizare e dată ecuația (.51) în care h_k^* este conjugatul complex al coeficientului funcției de transfer a canalului pe subpurtătoarea de index k, pe perioada respectivă de simbol OFDM

$$c_{k-MMS}' = c_k' \frac{h_k^*}{|h_k|^2 + 2\sigma^2} = \frac{c_k h_k h_k^* + z_k h_k^*}{|h_k|^2 + 2\sigma^2} = c_k \frac{|h_k|^2 + \frac{z_k h_k^*}{c_k}}{|h_k|^2 + 2\sigma^2} \quad (. 51)$$

- Inserarea egalizorului „MMSE” în receptor este prezentată în Fig. 20.

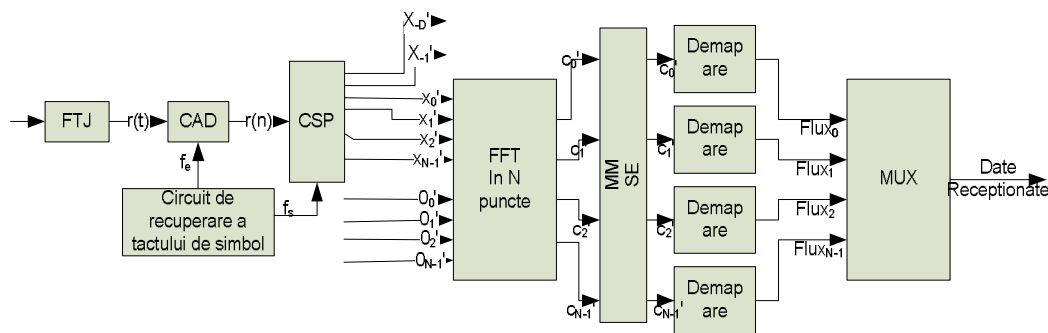
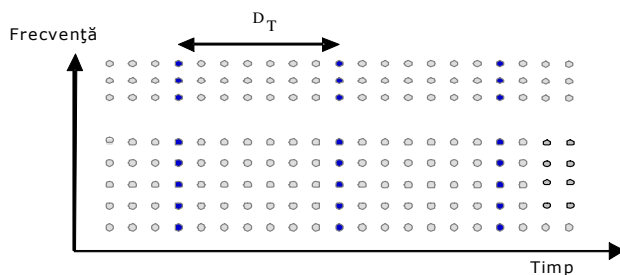


Fig. 20. Egalizare „Minimum Mean Squared Error (MMSE) Notă: blocurile de demapare includ și funcția de decizie a fazorului recepționat

- Pentru egalizarea canalului trebuie determinată funcția de transfer al acestuia, care este exprimată prin coeficienții complecși h_k pe subpurtătoarea f_k . În cazul canalelor lent variabile (de ex. canale fixe) funcția de transfer poate fi determinată prin transmisia periodică a unor semnale pilot cu valoare cunoscută pe întreaga bandă de frecvență pe o perioadă de simbol OFDM.

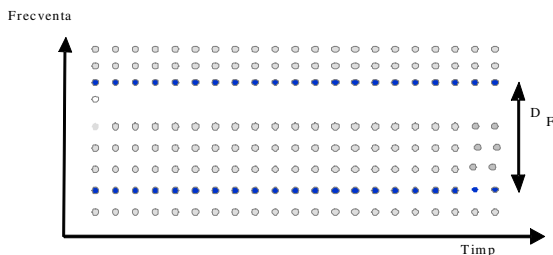


- Pe baza semnalului recepționat receptorul, cunoscând semnalul transmis, determină caracteristica de transfer a canalului. Această caracteristică este utilizată pentru egalizare până la recepția unui alt semnal de test. Repartizarea simbolurilor pilot pentru această metodă este reprezentată schematic în Fig. 21.

Fig. 21. Repartizarea semnalelor pilot pe întreaga bandă de frecvență – block type

- Frecvența de transmitere a acestor semnale de test trebuie să fie suficient de mare, astfel încât intervalul D_T să fie mai mic decât timpul de coerență a canalului.

- În cazul canalelor radio mobile, deoarece viteza de variație a parametrilor canalului este mare, măsurarea cu precizie acceptabilă a acestor canale cu metoda de mai sus ar reduce semnificativ eficiența sistemului, deoarece frecvența de transmisie a semnalelor de test (pilot) trebuie să fie mare.



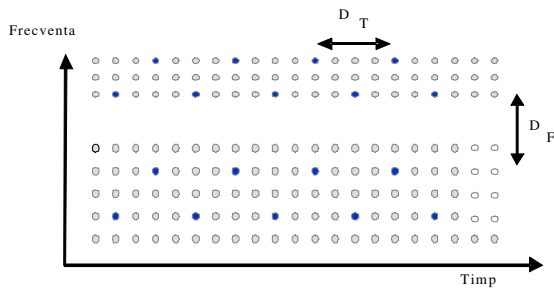
- În cazul transmisiilor mobile pentru măsurarea caracteristicii de atenuare se pot transmite simboluri pilot (date cunoscute) în mod continuu pe anumite subpurtătoare, numite subpurtătoare pilot, așa cum se arată schematic în Fig. 22

Fig. 22. Repartizarea simbolurilor pilot pe subpurtătoare pilot – comb-type

- Numărul de subpurtătoare pilot trebuie ales astfel încât canalul să fie eșantionat cu o frecvență de eșantionare care respectă teorema eșantionării, adică $D_F \leq 1/2\tau_M$, unde τ_M este întârzierea maximă a răspunsului la impuls a canalului; $1/(2\tau_M)$ aproximează banda de coerență a canalului

- Dacă această condiție este îndeplinită, valoarea aproximativă a funcției de transfer pentru celelalte subpurtătoare, adică a coeficienților h_k , poate fi obținută, cu o acuratețe suficient de bună, prin interpolare în domeniul frecvență.

- Dacă canalul are un răspuns relativ lung la impuls, raportat la durata perioadei de simbol (bandă de coerență redusă), această metodă impune utilizarea unui număr mare de subpurtătoare pilot, ceea ce ar scădea eficiența transmisiei.



- O soluție posibilă o reprezintă transmisia unor simboluri QAM pilot care să fie distribuite atât în timp cât și în frecvență ("scattered pilots"). Repartizarea simbolurilor QAM pilot este reprezentată în Fig. 23.

Fig. 23. Repartizarea simbolurilor pilot "împrăștiate" - "scattered pilots"

- În acest caz determinarea caracteristicii de transfer a canalului se realizează utilizând un număr mai mic de simboluri pilot, dar necesită efectuarea unei interpolări

bidimensionale (timp+frecvență).

- Valorile ecarturilor D_T și D_F trebuie să îndeplinească simultan condițiile menționate mai sus.

- În practică, se aplică atât subpurtătoarele pilot cât și simbolurile pilot împrăștiate.

- Analiza metodelor de interpolare în timp și sau frecvență depășește cadrul cursului de față.

9. Efecte adverse ale canalelor de transmisie.

- Tehnica OFDM este foarte eficientă pe canalele afectate de propagări multicanale sau de interferență intersimbol, dar este afectată de următoarele distorsiuni și interferențe apărute pe canalul de transmisie.

Efectul Doppler

- O deviație în frecvență datorată efectului Doppler poate duce la pierderea ortogonalității dintre subpurtătoare, ducând la apariția ICI.

- Efectele deviației în frecvență a spectrului semnalului recepționat sunt echivalente cu efectele recuperării incorecte a purtătorului local. Compensarea acestei deviații se poate face simultan cu recuperarea și sincronizarea purtătorului local. De asemenea, efectele deviației de frecvență se pot compensa parțial după blocul de IFFT prin înmulțirea cu coeficienții exprimați de relațiile (36), (37) sau (38) din paragraful 6, dedicat efectelor recuperării incorecte a purtătorului local sau prin precodare inter-subpurtătoare la emisie.

Zgomote de impuls

- Semnal multipurtător este integrat pe o perioadă destul de mare (perioada de simbol OFDM) și de aceea este afectat mult mai puțin de acest tip de zgomote decât modulațiile monopurtător.

Atenuări

- Transmisiile radio sunt supuse deseori unor atenuări în întreaga bandă de frecvențe în așa măsură încât raportul semnal/zgomot coboară la nivelele sub cele admisibile pentru perioade de timp foarte mici. În sistemele multipurtător, deoarece atât semnalul cât și zgomotul sunt integrate pe o perioadă de simbol OFDM (perioadă ce este mult mai mare decât durata atenuărilor), raportul semnal/zgomot mediu se menține în limite acceptabile.

Jitterul de fază

- Efectul jitterului de fază asupra transmisiilor multipurtătoare este echivalent cu o creșterea nivelului zgomotului alb. Acest lucru se datorează faptului că puterea spectrală a jitterului se distribuie uniform pe toată banda ocupată, afectând la fel toate subcanalele și datele transportate de acestea.

Interferențe în domeniul frecvență

- Sistemele OFDM sunt destul de sensibile la interferențele în domeniul frecvență, cum sunt interferențele unitonale. La transmisiile monopurtător, unde o singură purtătoare ocupă întreaga bandă de frecvență, o interferență monotonală nu va afecta transmisia atâta timp cât nivelul acesteia va fi destul de mic în comparație cu puterea semnalului purtător. La transmisiile OFDM puterea semnalului este divizată în N subpurtătoare, cele cu putere recepționată mică fiind afectate de interferența monotonală, dacă aceasta corespunde frecvențelor respective, și în consecință datele transmise pe acestea sunt eronate; aceste erori sunt compensate (parțial) prin utilizarea codurilor corectoare

Distorsiuni neliniare

- Sistemele multipurtător sunt mult mai sensibile la distorsiuni de neliniaritate, cum ar fi cele introduse de amplificatorul final de radiofrecvență, decât cele monopurtător.

- Dacă datele de intrare care modulează subpurtătoarele sunt independente din punct de vedere statistic și dacă numărul de subpurtătoare N este mare, distribuția nivelului semnalului OFDM este în general gaussiană, independent de constelațiile folosite la modularea subpurtătoarelor sau de numărul de

subpurtătoare, spre deosebire de sistemele monopurtător unde raportul dintre puterea maximă și cea medie (PAPR, peak/average power ratio) depinde doar de constelația folosită.

- considerând N_m subpurtătoare modulate cu date care au aceeași distribuție statistică dar sunt independente (“independent and identically distributed” - i.i.d.) probabilitatea ca puterea de vârf să depășească o valoare impusă P_{v0} , ceea ce este echivalent cu probabilitatea ca PAPR să depășească valoarea corespunzătoare $PAPR_0 = P_{v0}/P_m$ este limitată inferior de:

$$P(PAPR > PAPR_0) \geq 1 - (1 - e^{-PAPR_0})^{N_m} \quad (.52)$$

- Deoarece la sistemele OFDM raportul PAPR poate lua valori foarte mari, chiar dacă aceste valori apar pe termen scurt, amplificatoarele de putere trebuie să funcționeze cu back-off ridicat.

- Valorile ridicate ale PAPR afectează semnificativ calitatea semnalului emis în banda alocată și produc interferențe în benzile de frecvență învecinate în special în cazul legăturilor UpLink ale rețelelor celulare datorită parametrilor amplificatoarelor finale de RF folosite în terminalele mobile.

- O soluție studiată în literatură pentru reducerea valorii PAPR a semnalelor multipurtător este adăugarea unor date modulate redundante, calculate în funcție de datele modulate utile ale simbolului OFDM respectiv, astfel încât semnalul OFDM rezultat să aibă un PAPR mult mai redus, urmată de suprimarea acestora după demodulare. Această soluție conduce însă la creșterea complexității și la scăderea eficienței spectrale.

- O altă variantă studiată constă în utilizarea constelațiilor de tip Offset-QAM (similare cu OQPSK)

- În cazul transmisiilor monopurtător, valoarea PAPR și valoarea maximă a semnalului depind numai de constelația utilizată (vezi curs TC/TM), semnalul modulat neavând o distribuție gaussiană a amplitudinii. Însă dezavantajul major al acestor transmisiuni este că sunt sensibile la caracteristici selective în frecvență ale canalelor de transmisie.

- De aceea, s-a căutat combinarea avantajelor OFDM, în privința distorsiunilor introduse de selectivitatea canalului, cu avantajul transmisiunii monopurtător, în privința valorii PAPR, obținându-se astfel tehnica Single-Carrier-FDMA (SC-FDMA), în cadrul căreia simbolurile sunt modulate în timp pe o singură purtătoare.

- Aceasta se realizează prin aplicarea unei transformate Fourier discrete (DFT) în N_u puncte, cu $N_u < N$, asupra celor N_u nivele modulate $c_k, k=1, \dots, u$, rezultate în urma mapării. Ieșirile circuitului DFT c_k' vor constitui nivelele modulate care se introduc la intrarea modulatorului OFDM (blocul IFFT), vezi Fig. 24. Pe celelalte $N-N_u$ se introduce nivelul modulatorului sau nivele impuse de generarea simbolurilor pilot.

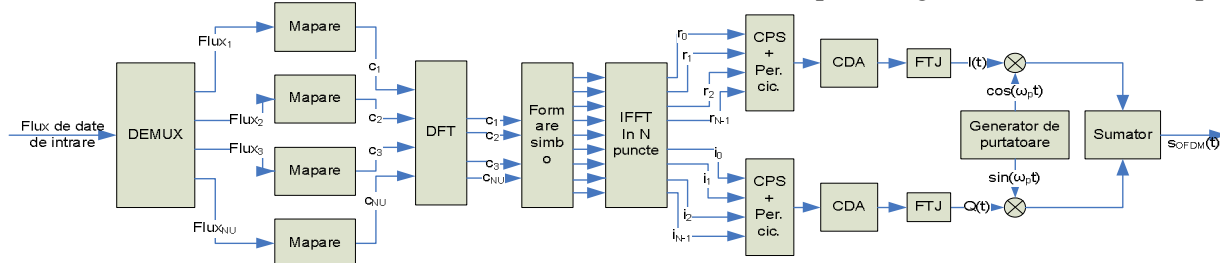


Fig. 24. Schema bloc a emitorului SC-FDMA

- În urma aplicării DFT asupra nivelelor modulate c_k , care sunt privite ca eșantioane în timp, a mapării nivelelor modulate pe intrările $p, \dots, p+N_u$, care corespund subpurtătoarelor $p f_s, \dots, (p+N_u) f_s$, și aplicării IFFT în N puncte, eșantioanele rezultante sunt eșantioanele unui semnal în timp care are valorile amplitudinii și PAPR similare semnalului de la intrarea DFT și spectrul BB plasat în domeniul $p f_s, \dots, (p+N_u) f_s$. Această proprietate poate fi explicată principial prin faptul că DFT „împrăștie” simbolurile de la intrare (de amplitudini diferite) pe toate cele N_u subpurtătoare, simbolurile c_0, \dots, c_{N_u} având amplitudinea aproximativ egală cu amplitudinea medie a simbolurilor ce intră în DFT

- Deoarece transformatele IFFT și FFT sunt complementare, datorită utilizării unui bloc DFT pentru „precodare”, semnalul obținut în urma modulării OFDM va avea amplitudinea maximă și PAPR ale unui semnal monopurtător.

- Inserarea simbolurilor pilot în IFFT (după DFT) afectează în oarecare măsură factorul PAPR al SC-FDMA

- Receptorul SC-FDMA trebuie să conțină, în plus față de receptorul OFDM un bloc IDFT care să execute operația inversă DFT-ului efectuat la emisie, vezi schema bloc din Fig. 25

- Studiile efectuate arată că valorile PAPR ale SC-FDMA sunt mai mici cu valori cuprinse între 10 dB (pentru QPSK) și 7 dB (pentru 16-QAM), față de de valorile PAPR asigurate de OFDM.

- Valorile PAPR depind însă și de tehnica de acces folosită, vezi paragraful 11.

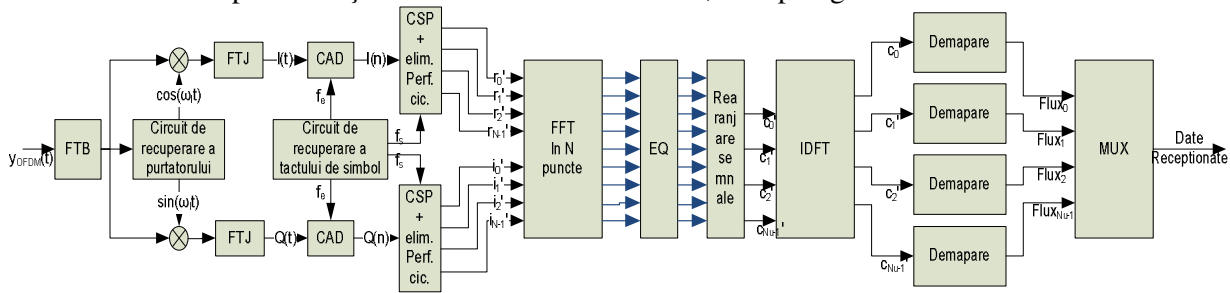


Fig. 25. Schema bloc a receptorului SC-FDMA

- Utilizarea SC-FDMA conduce și la scăderea SINR după egalizarea cu metoda MMSE a canalelor selective în frecvență. Mărima acestei degradări depinde de tehnica de acces folosită, vezi par. 11.

- Această soluție este adoptată în sistemul celular LTE-Advanced pentru legătura uplink.

- Simbolurile pilot folosite pentru egalizare și modulate pe subpurtătoarele $1, \dots, p+1$ și N_u+p+1, \dots, N_m sunt demodulate de FFT și folosite ca atare, fără a fi introduse în IDFT.

10. Avantajele și dezavantajele modulației OFDM

- Sistemele de transmisii OFDM au următoarele avantaje:

- sunt flexibile, satisfăcând diverse cerințe cum ar fi, complexitatea, eficiență spectrală, modelare spectrală și performanțe.
- nu necesită adaptare instantanee la răspunsul la impuls a canalului. Sunt robuste la interferențe de tip impuls și la variații ale canalului. Detecția diferențială poate elimina necesitatea folosirii egalizoarelor, nefiind astfel nevoie de secvențe de antrenare, ceea ce conduce la creșterea eficienței transmisiei (dar reduce performanțele de SNR cu cel puțin 3 dB). Semnalul de modulat este afectat doar de variațiile de la o perioadă de simbol la următoarea; erorile nu se acumulează
- Fiind o tehnică de transmisie paralelă este mai imună la deplasări ale momentelor de sondare decât transmisiile seriale, datorită faptului că perioada de simbol OFDM e mare
- Pe măsura creșterii numărului N , eficiența spectrală crește; trebuie avut în vedere că, pentru o lărgime de bandă dată, numărul de subpurtătoare este limitat superior datorită limitării valorii inferioare a f_s din cauza dispersiei Doppler în frecvență a spectrului.
- Este simplu de implementat un sistem variabil debit de date / lărgime de bandă prin variația raportului debit de date / număr de subpurtătoare.
- Permite utilizarea unor benzi de frecvență concatenate și/sau agregate, folosind transmisia cu o singură purtătoare de canal, prin modularea selectivă a unor grupuri de subpurtătoare
- Un sistem OFDM care utilizează o codare și o întrețesere adecvate (COFDM) are performanțe superioare față de alte sisteme de transmisie, în special în condiții de transmisii pe canale radio mobile afectate de severe distorsiuni de propagare multicale. Modul de introducere a codurilor corectoare depinde de numărul de utilizatori și de modul de acces al acestora la sistemul de transmisie.

Dezavantajele sunt:

- Valorile mari ale PAPR care impun folosirea unui back-off ridicat la etajele de putere ale echipamentele de transmisiune și utilizarea unor etaje de putere mai performante, comparativ cu sistemele cu o singură purtătoare; tehnica SC-FDM asigură valori mai mici ale PAPR, dar implică procesări suplimentare și micșorează valoarea SINR după egalizare;
- Fiind transmisiile paralele sunt mai sensibile la deviații în frecvență ale purtătoarei de canal și la interferențe monotone, decât sistemele cu o singură purtătoare.
- Introducerea intervalului de gardă pentru combaterea ISI introduse de propagarea multicale, reduce eficiența spectrală a transmisiunilor OFDM.

11. Metode de acces

- Sistemul de transmisie OFDM poate fi utilizat de un singur utilizator, căruia i se atribuie întreaga bandă de transmisie, sau de mai mulți utilizatori, care împart debitul binar al transmisiei.

Tipurile de acces utilizate sunt:

a. TDMA-COFDM: acesta implică alocarea întregului debit unui utilizator pentru un interval de timp. Nu este foarte folosit.

b. FDMA-OFDM: implică alocarea permanentă a unui număr de subpurtătoare (subcanale) per utilizator.

- Numărul de subpurtătoare ale unui utilizator poate fi alocat în două moduri, vezi figura 28:

- modul grupat („localized”) în care subpurtătoarele sunt adiacente formând un grup compact
 - modul distribuit („distributed”) în care subpurtătoarele alocate unui utilizator sunt împrăștiate în întreaga bandă de frecvență. Un caz particular al acestui mod este modul întrețesut („interleaved”). În acest mod subpurtătoarele unui utilizator sunt împrăștiate echidistant cu un ecart $D \cdot f_s$, vezi Fig. 26.
- Alocarea de tip „localized” poate asigura utilizarea unei modulații mai bine adaptată la starea canalului, dar necesită un număr mai mare de simboluri pilot pentru a asigura o aceeași precizie a estimării stării acestuia, decât alocarea de tip „interleaved”



Fig. 26. Tipuri de alocare FDMA-OFDM (din Myung), $D=3$

- În ceea ce privește valorile PAPR, scăderea PAPR asigurată de SC-FDMA, față de OFDMA, cu alocare „localized” este mai mică decât cea asigurată de SC-FDMA cu alocare „interleaved”.
- Scăderea valorii SINR după egalizarea MMSE a canalului selectiv în frecvență este pronunțată la valori mari ale SNR din canal, afectând transmisiile cu număr mare de biți/simbol.
- Această degradare depinde și de tipul de alocare:
- pentru alocarea “localized” valoarea SINR scade cu circa 3 dB la $SNR = 30$ dB
 - pentru alocarea “interleaved”, valoarea SINR scade mai pronunțat. Degradarea SINR depinde de ecartul $D \cdot f_s$, crescând de la 5 dB, pentru $D = 4$ și putând ajunge la 10 dB pentru $D = 16$.
- c. TDMA+FDMA- este o combinație între metodele menționate mai sus. O variantă a acestui tip este OFDMA (OFDM Access) în care unui utilizator i se alocă S subpurtătoare pe durata a E perioade de simbol OFDM, adică $S \cdot E$ simboluri QAM. Acest mod de alocare este folosit în WiMax și LTE, fiind exemplificat în capitolele de Modulații Adaptive din prezentul curs și din cursul de Transmisii de date, an IV.
- În literatură se mai întâlnesc variante de tip CDMA-COFDM. O descriere principală va fi făcută după cursul de CDMA.

12. Aplicații

- Tehnica de transmisie Coded OFDM (COFDM) este folosită atât la transmiterea semnalelor de televiziune digitală (DVB) cât și la transmiterea semnalelor audio digitale (DAB).
- Pentru televiziunea digitală, se folosesc standardele DVB-T și DVB-T2, pentru difuziunea terestră, DVB-S și DVB-S2 pentru difuziunea prin satelit și DVB-H, pentru cea către echipamente mobile „hand-held”.
- Ca exemplu standardul DVB-T include o transmisie COFDM având următorii parametri:
 - Banda de frecvențe $B = 8$ MHz, $f_s = 64/7$ kHz, $\Delta = 1/4, 1/8, 1/16$ sau $1/32$ din T_u perioada utilă.
 - Codul corector exterior RS (204, 188, $t = 8$); codul interior PCC cu ratele $r = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$.
 - Constelații folosite 4, 16 sau 64 QAM.
 - Există două moduri de lucru: 8k având $N = 8192$, $N_u = 6819$, $T_u = 896$ μ s; 2k având $N = 2048$, $N_u = 1704$, $T_u = 224$ μ s.
 - Sistemul definește modul de întrețesere a datelor pe subcanale, mecanismul pentru transmiterea sigură a parametrilor transmisiei și alocarea simbolurilor dedicate sincronizării în fluxul OFDM. Se transmit subpurtătoare pilot în mod continuu (simboluri de antrenare invariante în timp) și celule pilot distribuite (simboluri de sincronizare cu secvență distribuită periodic atât în timp cât și în frecvență). Simbolurile de sincronizare sunt transmise cu o putere mai mare decât celelalte, la un raport de 16/9.
- Standardul DVB-T2 are moduri de lucru în care $N = 32768$ sau $N = 16384$ și în care s-au redus durata intervalului de gardă și procentul subpurtătoarelor pilot pentru a mări eficiența sistemului. Codurile folosite sunt LDPC (cod interior) și BCH (cod exterior), iar debitul maxim cu un cod interior cu rata $2/3$ poate atinge 40.2 Mbps, față de de 27,1 Mbps al DVB-T
- Sistemele DVB-S și DVB-S2 au parametri similari, o diferență esențială fiind faptul că utilizează modulații de tip PSK (4, 8, 16) și A+PSK circulară de tip I, pentru a reduce valoarea PAPR a semnalului OFDM.
- Variante ale tehnicii OFDM sunt utilizate în transmisiunile în rețelele WiFi, conform, conform standardelor 802.11. a., g., n, ac, ad, ax, ay. Acestea vor fi discutate în capitolul dedicat modulațiilor adaptive.
- Un alt domeniu în care este utilizată tehnica COFDM este interfața radio a sistemelor de comunicații mobile din generația 4-a, LTE și LTE-A. Pentru legătura descendentă (DL) sistemul folosește OFDM cu separația în frecvență $f_s = 15$ kHz (7.5 kHz -numai pe DL), FFT/IFFT fiind făcute în $N = 2048$ (sau 4096) puncte. Lărgimea de bandă ocupată variază între 1,4 MHz și 20 MHz, pentru aceasta din urmă fiind modulate $N_u = 1200$ (2400) subpurtătoare. Intervalul de gardă normal are valoarea $\Delta = 5.2083$ (cca $T_s/12,8$), iar frecvența de simbol utilă este $f_s = 13.913$ kHz. Modulațiile folosite sunt QPSK, 16-QAM și 64-QAM.

Pentru legătura ascendentă este folosită tehnica SC-FDMA. Pentru corecția erorilor se folosesc turbocoduri sau, opțional, coduri LDPC. Pentru accesul multiplu, unui utilizator i se alocă blocuri de resurse a câte 7 perioade de simbol OFDM x 12 subpurtătoare fiecare. O descriere mai detaliată a sistemului LTE va fi prezentată la cursul de Sisteme de transmisiuni din anul II.

- Mai trebuie remarcate alte două sisteme precursoare ale sistemelor 4G, care erau în faze de testare încă din 2007 în SUA și Coreea de Sud, elaborat de firma americană Flarion, și în Japonia, elaborat de firma japoneză DoCoMo.

- Variante ale tehnicii OFDM sunt avute în vedere pentru interfața radio a sistemului 5G aflat în curs de standardizare. O prezentare a variantelor aflate în studiu și a principalelor îmbunătățiri urmărite va fi făcută la laborator.