

## Modulații adaptive

### Considerente generale

- datorită mobilității utilizatorilor, propagării multicale și distanței variabile la care se află posturile corespondente, nivelul semnalului recepționat, și implicit valorile raportului semnal/zgomot, poate lua valori în domenii extrem de largi pe un canal radio (fix sau mobil).
- în cazul transmisiilor pe cablu nivelul semnalului recepționat depinde atât de frecvența semnalului transmis cât și de panta caracteristicii de atenuare a cablului, care la rândul ei depinde de caracteristicile constructive ale legăturii cât și de lungimea acesteia
- de aceea, pentru asigurarea unor debite binare efective (sau a unor eficiențe spectrale) maxim posibile, cu condiția menținerii probabilității de eroare de bit BER (sau de bloc de date, BLER) sub o valoare limită impusă  $BER_t$  ( $BLER_t$ ), este necesară utilizarea adaptivă a modulațiilor și a ratelor de codare disponibile, precum și modificarea adaptivă a numerelor de biți codați și necodați ce sunt mapați, printr-o regulă de mapare care să asigure BER minim posibil, pe un simbol QAM.
- deoarece atât debitul binar cât și BER (BLER) depind de toți parametrii transmisiei menționați mai sus, aceștia trebuie priviți ca un ansamblu, numit configurație de transmisie, iar adaptarea sistemului la variabilitatea canalului se manifestă prin modificarea corespunzătoare a configurației utilizate.
- o configurație este ansamblul compus din constelația de semnale utilizată (tipul modulației și numărul de biți/simbol,  $n$ ), codul corector (definit de tipul de cod și rata de codare), numerele de biți codați și necodați mapați pe un simbol QAM, modalitatea de mapare a biților pe simbolul QAM și numărul de simboluri QAM pe care se aplică schema de transmisie.
- modulațiile adaptive sunt utilizate atât în cazul în care întreaga bandă de frecvență este alocată unui singur utilizator (single access), la un moment de timp, cât și în transmisiile cu acces multiplu (multiple access), în care unui utilizator îi este alocată, la un moment de timp, doar o parte din banda de frecvență a transmisiei.
- pentru cazul transmisiilor cu acces multiplu vom considera o transmisie OFDM având  $N_{sbc}$  subpurtătoare, frecvența de simbol  $f_s$  și intervalul de gardă (prefix ciclic)  $u \cdot T_s$ .

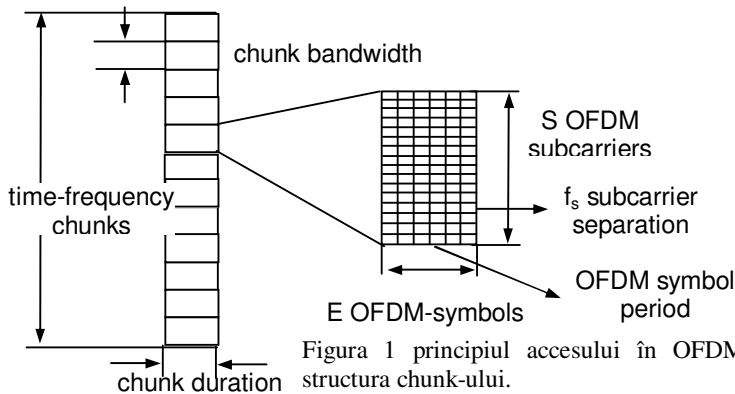


Figura 1 principiul accesului în OFDMA și structura chunk-ului.

- unui utilizator  $i$  se alocă  $S$  subpurtătoare pe durata a  $E$  perioade de simbol OFDM. Numărul simbolurilor QAM utile este  $U < E \cdot S$ , presupunându-se că  $Q = E \cdot S - U$  simboluri sunt de „serviciu”.
- această structură, denumită „radio resource unit (RRU)”, sau uneori „chunk”, este reprezentată în figura 1 și are banda de frecvență egală cu  $BW_{ch} = S \cdot f_s$  și durata  $T_{ch} = E \cdot T_s(1+u)$ .

- pentru legăturile pe cablu, care deserveșc un singur utilizator, se va considera  $S = g_i$ , numărul de tonuri căruia  $i$  se atribuie aceeași configurație (ansamblu constelație QAM + cod corector + mapare), iar  $E$ , durata chunk-ului în perioade de simbol DMT, depinde de intervalul de timp la care sistemul de transmisie respectiv face achiziția stării canalului.

- rata unei configurații codate se calculează în cazul general cu relația:

$$R_{cfgi} = \frac{n_{ci} \cdot R_{ci} + n_{ni}}{n_i}; n_i = n_{ci} + n_{ni} \quad (1)$$

în care  $n_i$ ,  $n_{ci}$  și  $n_{ni}$  reprezintă respectiv numerele de biți, total, codați și necodați mapați pe o constelație  $i$ .

- în cazul configurațiilor necodate sau codate cu coduri convoluționale sau turbocoduri, se va adăuga CRC de  $t$  biți pentru a putea determina dacă chunkul respectiv a fost recepționat corect..

- debitul binar nominal asigurat de o configurație utilizată în scheme de transmisie definită mai sus se calculează cu relația:

$$D_{ci} = C_R \cdot U \cdot n_i \cdot R_{cfgi} \text{ (bit/s)} \quad (2)$$

în care debitul de chunkuri  $C_R$  se calculează cu relația:

$$C_R = \frac{f_s}{(1+u) \cdot E} = \frac{f'_s}{E} \quad (3)$$

- debitul efectiv (throughputul) asigurat se calculează cu una din relațiile (4), în funcție de criteriul de stabilire a corectitudinii transmisiei:

$$\Theta_{ci}(\text{SNR}) = C_R \cdot U \cdot n_i \cdot R_{cfgi}(1-p_{bi}(\text{SNR})) \text{ sau } \Theta_{ci}(\text{SNR}) = C_R \cdot U \cdot n_i \cdot R_{cfgi}(1-\text{CER}_i(\text{SNR})) \quad (4)$$

unde  $\text{CER}_i$  probabilitatea de eronare a unui chunk se exprimă în funcție de numărul de biți “transportați” de acel chunk și de  $p_{bi}$  a configurației  $i$  utilizate la valoarea curentă a SNR.

- probabilitatea de eroare a unui chunk depinde atât de probabilitatea medie de eronare a unui bit  $p_{bi}$  la valoarea SNR considerată, cât și de modul de distribuire a erorilor de bit în blocul recepționat, care la rândul său depinde atât de canal cât și de decodorul utilizat. Un calcul exact al acestora trebuie efectuat pentru fiecare caz particular în parte.

- o abordare mai simplă se bazează pe calculul valorii  $\text{CER}_i$  pentru o distribuție uniformă (binomială) a erorilor de bit în chunkurile care alcătuiesc mesajul; această abordare conduce la obținerea unei valori-limită superioare („upper-bound”) a CER, care este dată de:

$$\text{CER}_i(\text{SNR}) \leq 1 - (1 - p_{bi}(\text{SNR}))^{n_i \cdot U} \quad (5)$$

- eficiențele spectrale, nominală și efectivă (în funcție de valoarea SNR), asigurate de o configurație în schema de transmisie de mai sus se calculează utilizând relațiile (6.a) și (6.b):

$$\beta_{cinom}(\text{SNR}) = \frac{D_{ci}}{BW_c} = \frac{f_s \cdot U \cdot n_i \cdot R_{cfgi}}{(1+u) \cdot E} \cdot \frac{1}{S \cdot f_s} \quad (6.a)$$

$$\beta_{ci}(\text{SNR}) = \frac{\Theta_{ci}(\text{SNR})}{BW_c} = \frac{f_s \cdot U \cdot n_i \cdot R_{cfgi}}{(1+u) \cdot E} \cdot \frac{1}{S \cdot f_s} \cdot (1 - \text{CER}_{ci}(\text{SNR})) \quad (6.b)$$

- pentru variația eficienței spectrale efective  $\beta_{ci}$  cu SINR vezi figura de pe tablă

- pentru cazul transmisiilor DSL, relațiile de mai sus se mai înmulțesc cu constanta 68/69, vezi cursul de DMT.

- în cazul transmisiilor monopurtător lărgimea de bandă este egală cu  $f_s(1+\alpha)$ ,  $S = 1$ ,  $G = 0$ , iar valoarea lui  $E \cdot T_s$ , adică a timpului alocat pentru un bloc de date al unui utilizator, depinde de frecvența cu care sistemul de transmisie achiziționează starea canalului.

- probabilitatea de eroare după decodare se poate calcula în funcție de valoarea SNR folosind formule specifice tipului de cod și modulației utilizate. O metodă de calcul aproximativ implică utilizarea relațiilor care exprimă probabilitatea de eroare de simbol în funcție de SNR:

- pt constelațiile 4,...N QAM

$$p_s = \frac{4(\sqrt{N}-1)}{\sqrt{N}} Q\left(\sqrt{\frac{3p}{N-1}}\right) \approx \frac{4(\sqrt{N}-1)}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{N-1}}{\sqrt{6\pi p}} \exp\left(-\frac{3p}{2(N-1)}\right); \quad \rho = 10^{\text{SNR}/10}; \quad (7)$$

apoi aceasta se în parte la numărul de biți/simbol al constelației,  $p$ :

$$p_b \approx p_s/p \quad (8)$$

- pentru 2-PSK –  $p = 1$

$$p_s = Q(\sqrt{2\rho}) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\rho}} \exp(-\rho) \quad (9)$$

- În aceste formule raportul semnal/zgomot în exprimare liniară  $\rho$  se înlocuiește cu:

$$\rho_{ech} = \rho \cdot 10^{C_G/10}; \quad (10)$$

unde  $C_G$  reprezintă câștigul codării asigurat de utilizarea configurației codate

- Câștigul codării se determină pentru fiecare configurație codată, prin simulări pe calculator sau prin calcule teoretice, și depinde de tipul codului, de varianta de decodor folosită, de numărul biților codați și necodați mapați și de modalitatea de mapare și de decizie a biților necodați.

### **Condiții impuse setului de configurații care trebuie utilizate adaptiv în transmisiile radio**

a. fiecare configurație trebuie să asigure o eficiență spectrală maximă, față de celelalte configurații din set, pe un domeniu limitat al SNR; lărgimea acestui domeniu depinde de gama SNR ce trebuie acoperită de către sistemul adaptiv, de configurația în cauză și de numărul de configurații din set.

- b. pragurile care separă domeniile SNR pot fi setate după criterii diferite, în funcție de probabilitatea de eroare de pachet și de întârzierile acceptate de către aplicațiile transmise (pentru aplicații care sunt guvernate de protocoale de tip (H)-ARQ). se va discuta în cursul de master
- c. variațiile eficienței spectrale (throughputului) între o configurație și vecinii ei din set trebuie să aibă valori moderate, circa 0,5-0,8 bps/Hz; aceste variații asigură o granularitate mai mică a eficienței spectrale, afectând mai puțin eficiența spectrală medie a sistemului adaptiv dacă configurațiile sunt utilizate în afara domeniilor lor de optimalitate, datorită unor erori de estimare sau predicție a stării canalului. Această cerință impune un număr mare de configurații în set.

### ***Criterii de stabilire a pragurilor SNR pentru transmisiile pe canale radio***

- valorile pragurilor ce separă domeniul de utilizare al fiecărei configurații pot fi stabilite după două criterii:

1. Valorile absciselor punctelor de intersecție ale curbelor  $\beta_i$  (SNR) ale configurațiilor învecinate (CI)
  - acest criteriu face ca o configurație să fie utilizată pe întreg domeniul de SNR în care ea are eficiența spectrală cea mai ridicată din setul considerat
  - are dezavantajul că în partea inferioară a domeniului probabilitatea de eroare de chunk are valori mari
2. *Impunerea unei probabilități de eroare de chunk mai mică decât o valoare-prag (CER-t)*
  - acest criteriu asigură o probabilitate de eroare de chunk cel mult egală cu o valoare maximă care este specifică fiecărui tip de aplicație; o valoare uzuală este  $CER_t = 10^{-2}$  (CER-2).
  - are dezavantajul că nu utilizează configurațiile cu eficiență spectrală maximă la toate valorile SNR
  - valorile pragurilor stabilite după acest al doilea criteriu sunt mai mari decât cele stabilite conform primului criteriu.
  - intervalul SNR în care o configurație dată asigură cea mai mare eficiență spectrală, dintre cele W configurații ale setului utilizat, se numește o *stare a canalului* deoarece doar această configurație va fi utilizată, indiferent de valoare curentă a SNR atât timp cât aceasta rămâne în acest interval. Numărul stărilor canalului este egal cu numărul de configurații care sunt utilizate adaptiv, adică numărul de elemente din setul de configurații.

### ***Exemple de seturi de configurații***

- seturile de configurații codate C și necodate NC prezentate în continuare are eficiențele spectrale calculate pentru schema de transmisie OFDM-A cu următorii parametri:

- $N_{sbc} = 416$  subpurtătoare utile cu o separație în frecvență  $f_s = 39.0625$  kHz;
- chunkul alocat fiecărui utilizator are  $E = 12$  perioade de simbol și  $S = 8$  subpurtătoare și conține  $U = 81$  simboluri QAM utile;
- numărul maxim de utilizatori ce poate fi acceptat este  $N_{usM} = N_{sbc}/S = 52$ .
- debitul de chunkuri este  $C_R = 2983.5$  ch/s, pentru un interval de gardă  $u \cdot T_s = 0.125 \cdot T_s$ ;
- lărgimea de bandă ocupată de un chunk este  $BW_{ch} = 312.5$  kHz.

- pentru valorile numerice de mai sus eficiența spectrală, (6.b) asigurată de o configurație se calculează cu relația:

$$\beta_{ci}(\text{SNR}) = 0,75 \cdot n_i \cdot R_{cfgi} \cdot (1 - CER_{ci}(\text{SNR})) \quad (6.c)$$

- eficiențele spectrale asigurate de setul de configurații necodate NC au fost calculate într-o schemă de transmisie similară al cărui factor este 0,72 (în loc de 0,75 din (6.c)), datorită inserării biților CRC pentru stabilirea corectitudinii chunk-ului, dar cu rata configurației (1)  $R_{cfg} = 1$

- în cazul transmisiilor codate, datorită utilizării codurilor LDPC, coduri bloc, corectitudinea datelor transmise pe durata unui chunk se poate determina comparând valoarea sindromului cuvântului de cod (transportat de acel chunk) cu „0”.

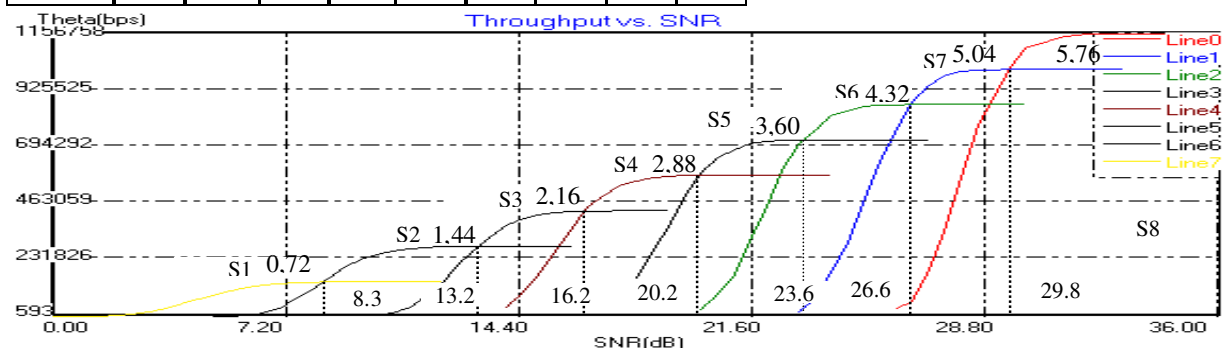
#### ***a. Set de configurații necodate - NC***

- acest set este compus din constelațiile 2-PSK și 4, 8, 16, 32, 64, 128 și 256-QAM.
- domeniile SNR în care fiecare configurație este optimă sunt delimitate de pragurile  $T_i$  care reprezintă valorile absciselor punctelor de intersecție ale curbelor  $\eta_{ci}(\text{SNR})$  învecinate. Tabelul 1 conține valorile  $n_i$ , pragurile  $T_i$  și valorile eficienței nominale asigurate de fiecare configurație.
- pragurile  $T_i$  au fost stabilite conform criteriului CI
- fig.2 prezintă variațiile eficiențelor spectrale asigurate de configurațiile necodate ale setului NC
- setul de configurații necodate nu acoperă întreg domeniul SNR considerat, deoarece la valori ale

SNR sub 5 dB eficiența spectrală asigurată devine inacceptabil de mică; aceasta se datorează faptului că modulația 2-PSK (necodată) asigură un BER foarte mare, ceea ce face ca CER să atingă o valoare inacceptabil de mare care conduce la scăderea acestei eficiențe

$n_i$ bit/sb	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_i$ [dB]	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$
SNR <		8.3	13.2	16.2	20.2	23.6	26.6	29.8	$\infty$
$\beta_i$ bit/s/Hz	0	0.72	1.44	2.16	2.88	3.6	4.32	5.04	5.76

Tabelul 1. Parametrii setului NC de configurații necodate - configurația 0 corespunde întreruperii legăturii („outage”)



.Figura 2.  $\beta$  vs. SNR ale configurațiilor setului NC – tabelul 1

- valoarea SNR  $T_0$  sub care CER asigurat de 2-PSK devine mai mare decât CER<sub>i</sub> este pragul sub care sistemul întrerupe legătura (“outage”), iar probabilitatea ca SNR-ul canalului să ia valori mai mici decât  $T_0$  se numește “outage probability”; valoarea  $T_0$  depinde de valoarea lui CER<sub>i</sub>
- domeniul SNR acoperit este redus și datorită numărului redus de configurații utilizate,  $W = 8$ .
- valorile eficiențelor spectrale asigurate în domeniile de optim sunt destul de mici
- diferențele dintre eficiențele spectrale asigurate de configurațiile învecinate sunt relativ mari, 0,72 bps/Hz, (granularitate mare); în cazul unor erori de estimare/predicție a stării canalului, debitul efectiv asigurat va scădea destul de mult sub cel optim

#### b. Set de configurații codate LDPC – C

- acest set este compus din 12 configurații codate LDPC, care utilizează constelațiile de la 2-PSK până la 256-QAM
- pentru a mări numărul de configurații posibile și a micșora granularitatea asigurată, ratele configurațiilor au fost modificate atât prin schimbarea ratelor codurilor incluse, cât și prin modificarea numerelor de biți codati și necodati mapați pe un simbol QAM.
- tabelul 2 sintetizează parametrii configurațiilor ce compun setul C

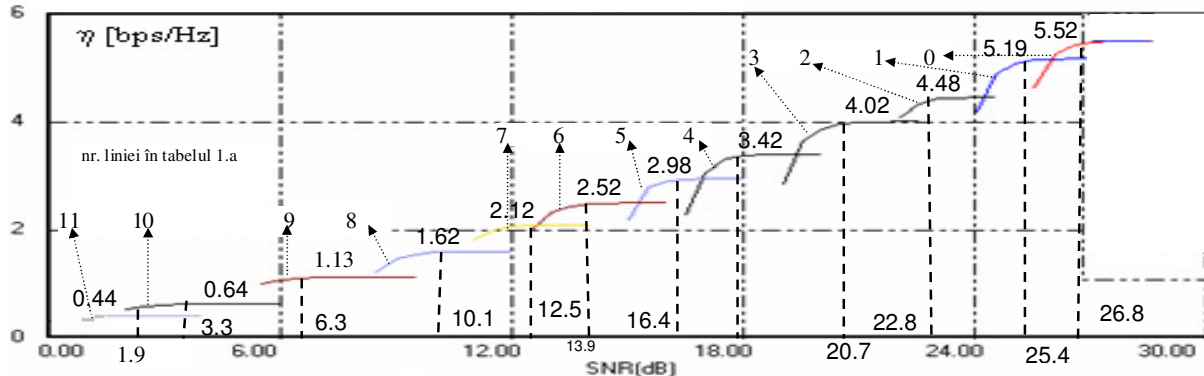
No	$n_i$	$n_{ci}$	$n_{ni}$	$R_{ci}$	$R_{cfig}$	$\beta_{ci}$ [bps/Hz]	$T_{iCER-2}$ [dB]	$T_{ICI}$ [dB]	$C_G$ [dB]
0	8	2	6	0.70	0.92	5.52	26.8	26.1	4.5 vs. 256Q
1	8	4	4	0.80	0.865	5.19	25.4	24.3	5.5 “
2	8	4	4	0.50	0.74	4.48	22.8	22.0	8.0 “
3	6	2	4	0.70	0.89	4.02	20.7	19.8	4.0 vs 64 Q
4	6	4	2	0.66	0.76	3.42	17.9	17.0	7.0 “
5	6	6	0	0.66	0.66	2.98	16.4	15.5	7.5 “
6	4	2	2	0.70	0.84	2.52	13.9	12.7	5.0 vs 16 Q
7	4	2	2	0.44	0.70	2.12	12.5	10.9	6.5 “
8	4	4	0	0.636	0.55	1.62	10.1	8.4.	9.0 “
9	2	2	0	0.77	0.76	1.13	6.3	4.7	4.5 vs 4-Q
10	2	2	0	0.5	0.43	0.64	3.3	2.0	7.5 “
11*	1	1	0	0.625	0.59	0.44	$-\infty$ (2.2)	$-\infty$ (1.0)	4.5 vs 2-PSK

Tabelul 2 Setul C de configurații QAM codate LDPC

\*- pragul acestei configurații este  $-\infty$  dB dacă ea e utilizată a păstra legătura într-un canal de foarte proastă calitate, la un debit binar de circa 103 kbps (=  $0.44 \cdot 0.75 \cdot 312.5$ );  
- dacă nu, pragurile ar fi 2.2 dB, CER <  $5 \cdot 10^{-2}$ , sau 1 dB (CI), sub care transmisia se întrerupe.

- prin  $R_c$  s-a nota rata codului utilizat, iar prin  $C_G$  câștigul codării asigurat față de configurația necodată care utilizează aceeași constelație.
- calculele detaliate arată că valorile SNR la care configurațiile care mapează și biți necodati, de rată  $R_{cfig}$ , asigură CER<sub>i</sub> sunt mai mici decât valorile SNR necesare configurațiilor care mapează numai biți de cod dar au rata codului  $R_c$  egală cu rata configurației ce mapează și biți necodati, adică  $R_c = R_{cfig}$  - **vezi cursul de master**

- eficiențele spectrale sunt calculate utilizând relația (6.c)
- tabelul conține valorile pragurilor  $T_i$  obținute pentru ambele criterii de stabilire; se observă că valorile pragurilor obținute cu criteriul CI sunt mai mici cu 0.7 – 1,5 dB decât cele obținute cu criteriul CER-2
- în figura 3 sunt prezentate curbele  $\eta_i(\text{SNR})$  ale configurațiilor din tabelul 2, cu pragurile CER-2.
- pentru comparație este reluată și figura 2



. Figura 3.  $\beta_{ck}$  vs. SNR ale configurațiilor setului C, tabelul 2;

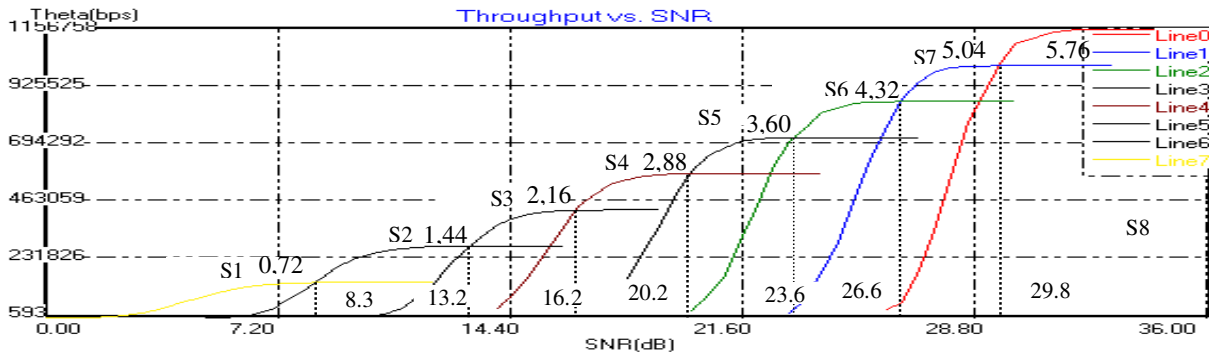


Figura 2.  $\beta$  vs. SNR ale configurațiilor setului NC – tabelul 1

- valorile BER necesare asigurării condiției  $\text{CER}=10^{-2}$  sunt cuprinse între  $2 \cdot 10^{-5}$ , pentru 256-QAM, și  $1.2 \cdot 10^{-4}$ , pentru 2-PSK.
- în acest caz avem  $\text{CER} \approx 1 - (1 - p_e)^{81} \rightarrow p_e \rightarrow \text{BER} \approx p_e/n$
- pragurile CI asigură o eficiență spectrală mai mare (cu 0.2 bps/Hz pentru  $\text{SNR} < 15$  dB), dar valorile CER ating  $5 \cdot 10^{-2}$ .
- pragurile CI pot fi utilizate în aplicații care nu sunt guvernate de protocoale H-ARQ;
- folosirea acestora în aplicații guvernate de protocoale H-ARQ ar conduce la scăderea debitului efectiv asigurat și la creșterea întârzierii, datorită probabilității mari de apariție a retransmisiilor.
- datorită numărului mai mare de configurații conținute, setul C acoperă un domeniu mai larg al SNR
- variațiile eficienței spectrale între configurații învecinate sunt mai mici, 0,3 – 0,7 bps/Hz (granularitate mai mică), și astfel variațiile eficienței spectrale la estimarea greșită a stării canalului să fie mai mici
- eficiențele spectrale asigurate sunt acceptabil de mari la un SNR dat
- eficiențele spectrale asigurate de setul C sunt mai mari decât cele asigurate de setul NC la un SNR dat, ceea ce conduce la debite binare efective mult mai mari
- aceasta se datorează utilizării unor constelații mai mari care, datorită codurilor și mapeării biților necodați, pot fi utilizate la valori mai scăzute ale SNR cu o probabilitate mică de eroare, cu o scădere a ratei relativ mică, astfel încât numărul biților utili corect decodați/simbol QAM, e mai mare decât cel asigurat la același SNR și cu aceeași probabilitate de eroare, de către configurațiile necodate.

### Calculul debitului binar efectiv și al eficienței spectrale medii ale unei transmisii adaptive

- performanțele unui sistem care utilizează adaptiv un set de configurații (ne)codate depind în principal de următorii factori:

- setul de configurații utilizat (constelație, cod, proporția dintre numerele de biți codați și necodați, modalitatea de mapare)
- metoda de alocare a poziției în frecvență a chunkului (metoda de acces)

- modul de setare a pragurilor care separă domeniile SNR în care constelația trebuie folosită.
- probabilitatea medie ca un chunk să fie corect recepționat  $p_{cch}^{av}$  se calculează sumând, după  $k$ , produsele dintre probabilitatea de stare  $w_k$  și probabilitatea  $p_{cchi}$  ca utilizând modulația  $i$  chunkul să fie corect (sau corectabil) recepționat.  $p_{cch}^{av}$  este dată de (11), în care  $W$  reprezintă numărul de stări ale canalului care este dictat de numărul de configurații din setul care este utilizat adaptiv; de exemplu  $W = 8$  pentru setul NC și respectiv  $W = 12$  pentru setul C.
- relația (11) este valabilă în ipoteza că în fiecare stare  $w$  a canalului, SNR aparține domeniului  $[T_{w-1}; T_w)$ , se utilizează configurația cu index  $i = w$  care asigură eficiență spectrală maximă (eventual cu condiția respectării constrângerii  $BER_w$  sau  $CER_w$  mai mică decât o valoare maximă impusă  $BER_t$  sau  $CER_t$ ) pe domeniul de SNR respectiv).

$$p_{cch}^{av} = \sum_{w=1}^W w_w \cdot p_{cch-w}(SNR_w); \quad \sum_{w=1}^W w_w = 1; \quad SNR_w \in [T_{w-1}; T_w); \quad (11)$$

$$pt \ p_{cch-w}(SNR_w) \geq p_{cch-t} \Rightarrow p_{cch}^{av} \approx p_{cch-t}$$

- probabilitatea de stare este influențată semnificativ de metoda de alocare a chunkului (sub-benzii de frecvență) unui utilizator - **unele detalii la laborator**
- probabilitatea de eroare a unei configurații  $i$   $p_{cch-i}$  pe domeniul de SNR de index  $w$  depinde atât de performanțele asigurate de configurația  $i$  pe domeniul  $w$ , cât și de acuratețea metodei de estimare (predicție) a valorii SNR-ului din canal; în mod ideal, această metodă trebuie să asigure ca  $i = w$ , adică fiecare configurație să fie utilizată numai pe domeniul de SNR pe care asigură eficiența maximă.
- probabilitatea de recepție corectă (corectabilă) a unui chunk este dificil de determinat, vezi considerentele premergătoare ecuației (5); o valoare-limită inferioară („lower-bound”) a acesteia se obține utilizând relația (5) și este dată de:

$$P_{cchi}(SNR) \geq (1 - p_{bi}(SNR))^{n_i \cdot U} \quad (12)$$

- debitul binar nominal mediu se calculează cu relația (13.a),
- în ipoteza asigurării unei probabilități de eronare a chunkului suficient de mică (variante de stabilire a pragurilor CER-t), valoarea medie a throughputului  $\Theta^{av}$  se calculează aproximativ (13.b) înmulțind debitul binar nominal mediu cu probabilitatea medie de decodare corectă a unui chunk, (11), iar eficiența spectrală medie se calculează (13.c) împărțind  $\Theta^{av}$  la lărgimea de bandă a chunkului.

$$D_n^{av} = C_R \cdot U \cdot \sum_{w=1}^W w_w \cdot R_{cfcgw} \cdot n_w; \quad a. \quad \Theta^{av} = C_R \cdot U \cdot \sum_{w=1}^W w_w \cdot R_{cfcgw} \cdot n_w \cdot p_{cch-w} \approx D_n^{av} \cdot P_{cch}^{av}; \quad b. \quad (13)$$

$$\beta^{av} \approx \frac{\Theta^{av}}{BW_{ch}} \approx \frac{D_n^{av}}{BW_{ch}} \cdot P_{cch}^{av}; \quad c.$$

## Concluzii

- performanțele asigurate de utilizarea adaptivă a unui set de configurații (codate sau nu) sunt afectate de următorii parametri ai sistemului de transmisie utilizat:
  - configurațiile componente ale setului utilizat (ale căror eficiențe spectrale și domenii de optimalitate depind de ratele codurilor utilizate, de numerele de biți codați și necodați mapați pe simbolul QAM și de modalitatea de mapare)
  - numărul de configurații existente în set, care afectează granularitatea eficienței spectrale, și lărgimea domeniului SNR care trebuie (sau este) acoperit
  - modalitatea de stabilire a pragurilor care separă domeniile de utilizare ale configurațiilor (care influențează probabilitatea de eroare de chunk și întârzierea în aplicații de tip ARQ)
  - metoda de alocare a subbenzii de frecvență fiecărui utilizator; aceasta poate asigura utilizatorului în cauză valori ale SNR mult mai mari decât valoarea medie a SNR-ului din canal pe durata chunkului respectiv, ceea ce conduce la utilizarea unor configurații de rată mai ridicată și implicit la eficiențe spectrale mai ridicate. Prețul plătit constă în creșterea volumului de calcule ce trebuie efectuate, de stația de bază, per interval de chunk și în creșterea traficului de semnalizare, datorită volumului sporit de informații ce trebuie trimis stației de bază.
  - modalitatea de estimare sau de predicție a valorilor SNR, care poate afecta eficiența globală prin utilizarea unor configurații care nu sunt optime pentru valoarea SNR existentă în canal.