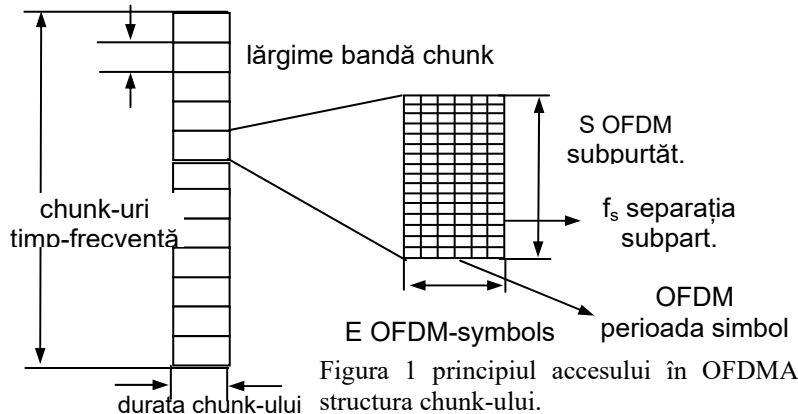


Modulații adaptive

Considerente generale

- datorită mobilității utilizatorilor, propagării multcale și distanței variabile la care se află posturile corespondente, nivelul semnalului recepționat, și implicit valorile raportului semnal/zgomot, pe un canal radio (fix sau mobil) poate lua valori în domenii extrem de largi,
- 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 posibil, cu condiția menținerii probabilității de eroare de bit BER (sau de bloc de date, BLER) sub o valoare limită impusă, 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, modalitatea de mapare a biților pe simbol QAM, și numărul de simboluri QAM pe care se aplică schema de transmisie.
- în această secțiune se vor considera doar configurații necodate (nu utilizează cod corector de erori)
- modulațiile adaptive sunt utilizate atât în cazul când 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) $u \cdot T_s$.



- 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 deservește un singur utilizator, se va considera $S = g_i$, numărul de tonuri cărui 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:

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

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:

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

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:

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

unde CER_i probabilitatea de eroare 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 eroare a unui bit p_{bi} la valoarea SNR considerată, cât și de modul de distribuire a erorilor de bit, care la rândul său depinde atât de canal cât și de decodorul utilizat. Un calcul exact al acesteia trebuie efectuat pentru fiecare caz particular în parte.

- o abordare mai simplă se bazează pe calculul valorii 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):

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

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

- 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 modulației utilizate prezentate în cursurile anterioare dedicate PSK și A+PSK

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

- 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.
- 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
- 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.

Criteriu de stabilire a pragurilor SNR pentru transmisiile pe canale radio

- valorile pragurilor care separă domeniile de utilizare a fiecărei configurații pot fi stabilite ca valorile SNR de la care transmisia cu acea configurație asigură o probabilitate 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 $\text{CER}_t = 10^{-2}$ ($\text{CER}_t=2$).

- 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.

Exemplu de set de configurații

- setul de configurații 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 $u \cdot T_s = 0.125 \cdot T_s$;
- lățimea 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:

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

- 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) $R_{cfig} = 1$

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 $\eta_{ci}(SNR)$ 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

n_i bit/sb	1	2	3	4	5	6	7	8
T_i [dB]	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	∞
β_i bit/s/Hz	0,72	1,44	2,16	2,88	3,6	4,32	5,04	5,76

Tabelul 1. Parametrii setului NC de configurații necodate

- figura 2 prezintă variațiile eficiențelor spectrale asigurate de configurațiile necodate ale setului NC.

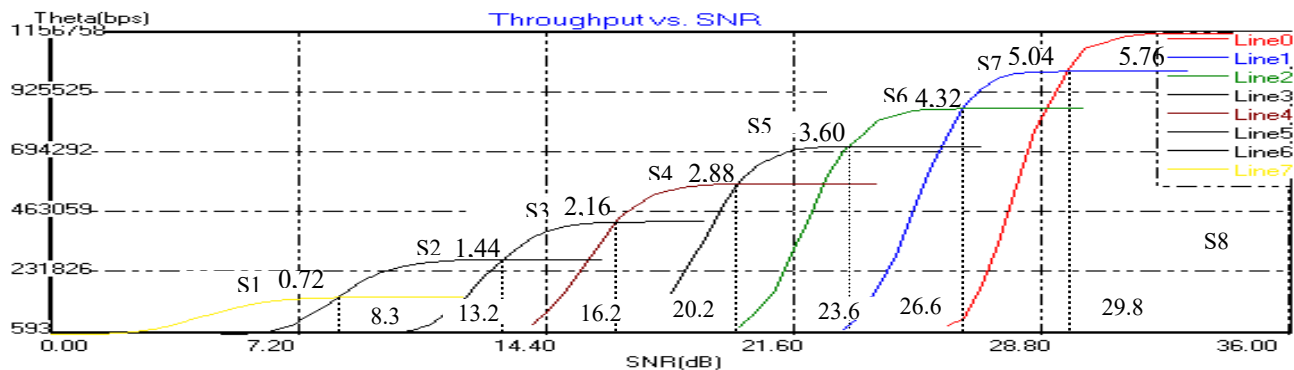


Figura 2. β vs. SNR ale configurațiilor setului NC – tabelul 1

- 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, care conduce la scăderea acestei eficiențe
- domeniul SNR acoperit este redus și deoarece numărul configurațiilor utilizate este scăzut, $W = 8$.
- 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 asigurată va scădea destul de mult sub cel optim
- extinderea domeniului SNR pentru care un set de configurații poate asigura $CER < CER_i$ este realizată prin utilizarea configurațiilor codate, în care pe lângă modificarea modulației (numărul de biți/simbol) se modifică și rata codului corrector, ceea ce permite creșterea numărului de configurații ale unui set
- 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 (granularitate mai mică), și

astfel variațiile eficienței spectrale la estimarea greșită a stării canalului să fie mai mici
- eficiențele spectrale asigurate de seturile de modulații codate sunt mai mari decât cele asigurate de setul NC la un SNR dat, ceea ce conduce la debite binare efective mult mai mari

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.

- probabilitatea p_{cch}^{av} este dată de (7), 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

- relația (7) este valabilă în ipoteza că în fiecare stare w a canalului, SNR aparține domeniului $[T_{w-1}; T_w]$, se utilizează configurația cu index w care asigură eficiență spectrală maximă (eventual cu condiția respectării constrângerii BER_w sau CER_w mai mică decât o valoare maximă impusă) pe domeniul de SNR respectiv).

$$p_{cch}^{av} = \sum_{w=1}^W w_w \cdot p_{cch-w}(SNR_w); \quad \sum_{w=1}^W w_w = 1; \quad SNR_w \in [T_{w-1}; T_w]; \quad (7)$$

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

- probabilitatea de stare este influențată semnificativ de metoda de alocare a chunkului (sub-benzii de frecvență) unui utilizator - **unele detalii la laborator**

- probabilitatea p_{cch-i} depinde atât de performanțele asigurate de configurația i pe domeniul de SNR de index w (starea w), cât și de acuratețea metodei de estimare (predicție) a valorii SNR-ului din canal; în mod ideal, această metodă trebuie să asigure ca $i=w$.

- pe un canal cu distribuție Rayleigh a nivelului semnalului recepționat, valorile probabilităților de utilizare a fiecărei configurații au o distribuție exponențială, depinzând de valoarea medie a nivelului semnalului recepționat.

- 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:

$$P_{cchi}(SNR) \geq (1-p_{bi}(SNR))^{n_i \cdot U} \quad (8)$$

- debitul binar nominal mediu se calculează cu relația (9.a),

- în ipoteza asigurării unei probabilități de eronare a chunkului suficient de mică (varianta de stabilire a pragurilor $CER-t$), valoarea medie a throughputului se calculează aproximativ (9.b) înmulțind debitul binar nominal mediu cu probabilitatea medie de decodare corectă a unui chunk, (7), iar eficiența spectrală medie se calculează (9.c) împărțind throughputul mediu la banda de frecvență a unui chunk.

$$D_n^{av} = C_R \cdot U \cdot \sum_{w=1}^W w_w \cdot R_{cfgw} \cdot n_w; \quad a.$$

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

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

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
- 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.