

#### 4. Eficiența protocoalelor H-ARQ de tipul III

- Principiul de funcționare al acestui tip de protocol H-ARQ, descris pe scurt la începutul acestui capitol, implică utilizarea succesivă a  $q+1$  coduri cu rate  $R_0 > R_1 > \dots > R_q$ , toate având același număr de biți informaționali  $L$  și respectiv  $S$ . Pentru a asigura același număr de biți informaționali, codurile pot fi obținute prin prescurtarea unor coduri bloc sau prin puncturarea unor coduri convoluționale

- Decodarea cuvântului de cod recepționat la cea de  $j$ -a retransmisie poate făcută în două moduri:

- decodând cuvintele de cod ale fiecărei retransmisii în mod independent, ceea ce implică ștergerea cuvintelor de cod decodate incorect în "încercările" anterioare
- combinând cele  $(j+1)$  copii ale celor  $L$  biți informaționali recepționați, prin sumarea celor  $j$  valori ale LLR-urilor fiecărui bit informațional (pentru codurile bloc sau convoluționale sistematice)

- Această combinație poate îmbunătăți performanțele transmisiei pe canale afectate de fading, datorită diversității în timp asigurate, dar implică utilizarea unor decodare „soft”.

- Deoarece fiecare cod este utilizat o singură dată putem considera că numărul de biți ai mesajelor codate și cei echivalenți perioadelor de comutare, în cazul utilizării codului de index  $j$  (nu exponent!), sunt:

$$N_t^j = (L + S + R_j \cdot N_d) / R_j \quad (41)$$

- Probabilitatea de achitare a unui mesaj în cazul utilizării codului  $j$  este dată de relația (6), vezi și relațiile (4) și (5), aplicată pentru acest cod, deoarece fiecare cod este la prima utilizare:

$$P_{0c}^j = (P_c^j)^{l_m + l_s^j}; \quad P_{Rc}^j = 1 - P_{0c}^j; \quad (42)$$

- Probabilitatea de achitare a blocului după utilizarea codului cu index  $j$  se calculează știind că acest cod este utilizat dacă cele  $j-1$  transmisii (ce a folosit coduri cu index  $0, \dots, j-1$ ) sunt nereușite, iar transmisia cu codul  $j$  reușește. Astfel  $P_c^j$  are expresia:

$$P_c^j = P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^{j-1} \cdot P_{0c}^j; \quad (43)$$

- Numărul mediu de biți utili achitați din utilizarea succesivă a  $q+1$  coduri este:

$$N_u = (L + S)(P_{0c}^0 + P_{Rc}^0 \cdot P_{0c}^1 + \dots + P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^{q-1} \cdot P_{0c}^q); \quad (44)$$

- Numărul mediu total  $N_t$  de biți transmiși pentru achitarea celor  $N_u$  biți utili, se calculează folosind relațiile (41) și (43). Pentru simplitatea expresiei vom considera că termenii  $R_j \cdot N_d$  au o valoare comună  $R_m \cdot N_d$ , unde  $R_m$  este media aritmetică a ratelor codurilor utilizate. Astfel,  $N_t$  are expresia:

$$N_t = (L + S + R_m \cdot N_d) \left( \frac{1}{R_0} + P_{Rc}^0 \cdot P_{0c}^1 \cdot \frac{1}{R_1} + \dots + P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^{q-1} \cdot P_{0c}^q \cdot \frac{1}{R_q} + d \cdot P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^q \right); \quad (45)$$

- Eficiența protocolului H-ARQ de tip III se obține făcând raportul dintre  $N_u$  și  $N_t$  și are expresia:

$$\eta_{\text{HIII-SW}} = \frac{L + S}{L + S + R_m \cdot N_d} \cdot \frac{(P_{0c}^0 + P_{Rc}^0 \cdot P_{0c}^1 + \dots + P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^{q-1} \cdot P_{0c}^q)}{\left( \frac{1}{R_0} + P_{Rc}^0 \cdot P_{0c}^1 \cdot \frac{1}{R_1} + \dots + P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^{q-1} \cdot P_{0c}^q \cdot \frac{1}{R_q} + d \cdot P_{Rc}^0 \cdot \dots \cdot P_{Rc}^q \right)} = \quad (46)$$

$$= \eta_{\text{HIII}} \cdot \eta_{\text{tHIII}}$$

- Modalitățile de determinare a timpului mediu de achitare a unui bloc și a întârzierii medii introduse de acest tip de protocol sunt similare cu cele descris în cazul protocolului H-ARQ de tip I.

- Eficiența asigurată de o variantă de tip SR a acestui protocol se obține făcând  $N_d = 0$  în relația (46).

- Acest protocol asigură o adaptare în trepte, „pas cu pas”, a ratei codului utilizat la starea curentă a canalului, asigurând astfel utilizarea configurației care asigură o probabilitate maximă de achitare a blocului de date, așa cum se arată în figura 2.

- Eficiența sa este micșorată de următoarele cauze:

- la fiecare retransmisie el transmite întreg blocul codat, deci biții informaționali sunt retransmiși de mai multe ori, dar decodarea se face pentru fiecare copie separat
- protocolul începe cu codul cu capacitate de corecție mică, și de aceea pe canalele cu  $p_b$  mare ajunge la codul potrivit după câteva transmisii cu probabilitate scăzută de achitare

- Pentru a crește eficiența, o variantă a acestui tip de protocol transmite biții informaționali doar la prima transmisie, iar apoi transmite doar biții de control corespunzători generați de codurile ce trebuie utilizate.

- această variantă poate fi implementată ușor doar cu coduri bloc și cu coduri convoluționale sistematice.

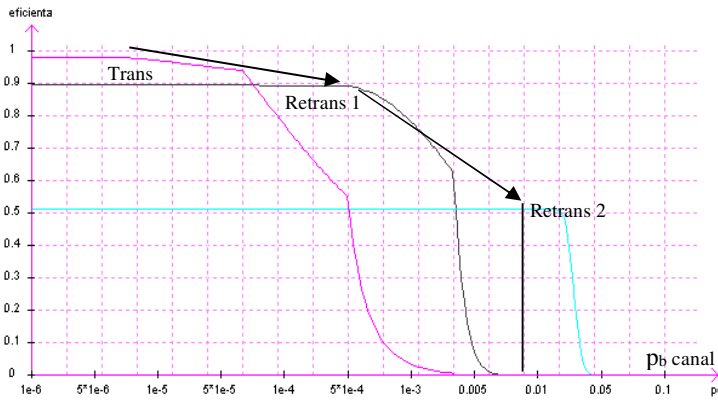


Fig. 2 Utilizarea adaptivă a familiei de coduri asigurată de protocolul H-ARQ de tip III

- Altă variantă prevede concatenarea codului de rată  $R_{j-1}$  utilizat în retransmisia anterioară cu un cod cu rată mică, codul rezultat având rata  $R_j < R_{j-1}$ . Această abordare utilizează faptul că uneori, două coduri concatenate cu rata globală  $R_g = R_1 \cdot R_2$  au capacitate de corecție mai bună decât un singur cod cu rata  $R_g$ .

- Protocolele H-ARQ de tip II și III asigură performanțe mai bune decât cel de

tipul I, datorită faptului că adaptează (în mod simplist) rata codului la canal.

- sistemele moderne de transmisiuni au incluse metode de estimare a stării canalului care să permită o adaptare mai rapidă și mai eficientă a redundanței utilizate în cazul retransmisiilor.

- Aceste metode utilizează:

- fie compararea valorilor SNR estimate (pe baza măsurării SNR din canal) pentru perioadele de frame următoare cu valori prag ale SNR care delimitează intervalele de SNR în care o configurație (rată de codare + modulație) asigură eficiența spectrală maximă (dintre configurațiile disponibile) cu condiția asigurării unei valori a BLER mai mici decât o valoare impusă  $BLER_t$ ,
- fie calculul valorilor BLER asigurate de fiecare configurație pentru valoarea SNR din canal („link performance prediction”); apoi, dintre configurațiile care asigură BLER mai mici decât  $BLER_t$ , se alege configurația care are eficiența spectrală nominală cea mai mare

- O comparație între performanțele asigurate de protocolele H-ARQ de tip II și III este dificil de realizat datorită numărului mare de factori care afectează performanțele.

- În general protocolul de tip II asigură o eficiență mai mare, deoarece numărul de biți de control transmiși pentru asigurarea acelorași rate ale codării e mai mic. Această afirmație e valabilă în ipoteza că puterea de corecție a claselor de coduri care permit puncturarea (turbocoduri sau coduri convoluționale) este aproximativ egală cu cea asigurată de clasele de coduri care pot fi utilizate în schemele cu rată adaptivă a codării (de obicei coduri bloc), la aceleași rate ale codării.

- Schemele menționate mai sus asigură performanțe bune pe canale staționare sau lent variabile în timp, adică pe canale a căror caracteristică nu se modifică semnificativ pe parcursul unui ciclu (transmisie inițială +  $q$  retransmisii, cum ar fi canalele radio fixe sau cablurile).

- Pe canalele radio mobile, care sunt rapid variabile în timp (în raport cu durata acestui ciclu), sunt necesare scheme care să estimeze sau chiar să prezică starea canalului, iar codul utilizat să fie cel care asigură eficiență maximă, dintr-o familie de coduri (sau de modulații codate) prestabilite, pentru starea respectivă a canalului, în mod similar utilizării modulațiilor codate adaptive.

### 5. Considerente privitoare la configurarea protocolelor H-ARQ în funcție de parametrii aplicației

- Parametrii unui protocol H-ARQ care trebuie setați sunt:

- lungimea blocului de date,  $L$ , lungimea blocului de confirmare fiind, în general, fixă
- probabilitatea de intrare în count timeout  $P_T$ , care este egală cu BLER, probabilitatea de pierdere a unui bloc (prin eronare) în cazul aplicațiilor de tip RT
- probabilitățile de achitare a blocului la cea de a  $j$ -a „încercare”
- numărul maxim de retransmisii efectuate  $q$

- Valorile acestor parametri trebuie setate astfel încât să asigure o eficiență  $\eta$  cât mai mare, cu condiția asigurării unei valori a BLER mai mică decât limita impusă  $BLER_t$  (care poate fi și probabilitatea maxim admisibilă de pierdere a unui bloc) și a unor valori ale întârzierii medii și (eventual) a întârzierii maxime mai mici decât cele impuse de aplicații,  $T_{av-t}$  și  $T_{max-t}$ .

- considerentele de mai jos se referă la un protocol H-ARQ generic; particularizări în funcție de tipul protocolului, I, II sau III, vor fi făcute la laborator.

- Pentru determinarea timpului mediu vom considera că transmisia inițială și retransmisiile se fac cu perioada frame-ului sistemului de transmisie, într-un sens, iar mesajele de confirmare sunt transmise în frame-ul pe sens invers imediat următor. De aceea, durata unui ciclu „mesaj-confirmare” va fi  $2 \cdot T_{frame}$ .

- Durata medie de achitării unui bloc se obține înmulțind numărul mediu de „încercări” efectuate de

protocol cu durata unei perioade  $2 \cdot T_{\text{frame}}$ .

- Numărul mediu de încercări se determină ca medie ponderată a multiplilor întregi  $j$  după care mesajul este achitat, ponderile fiind date de probabilitățile de achitare din a  $j$ -a „încercare”, vezi (47), în care  $P_{Rj}$  reprezintă probabilitatea de retransmisie după a  $j$ -a „încercare” specifică fiecărui tip de algoritm în parte.

$$T_{\text{av}} = N_{\text{av}} \cdot 2 \cdot T_{\text{frame}}; N_{\text{av}} = \sum_{j=0}^q (j+1) \cdot P_{R(j-1)} \cdot (1 - P_{Rj}); P_{R(j-1)} = 1 \text{ pt. } j=0 \quad (47)$$

- În (47) se impune ca  $P_{R(-1)} = 1$  pentru a obține o relație compactă

- Pentru canal identic în cele  $q+1$  încercări: 
$$N_{\text{av}} = \sum_{j=0}^q (j+1) P_R^j P_0 = \frac{1 - (q+1)P_R^q + qP_R^{q+1}}{1 - P_R} \quad (47')$$

- Similar, timpul maxim necesar achitării (după  $q+1$  încercări) este exprimat de prima parte a relației (48) și apare cu probabilitatea  $P_{\text{max}}$  exprimată de a doua parte a (48) :

$$T_{\text{max}} = N_{\text{max}} \cdot 2 \cdot T_{\text{frame}} = (q+1) \cdot 2 \cdot T_{\text{frame}}; P_{\text{max}} = P_{R(q-1)} \cdot (1 - P_{Rq}) \quad (48)$$

- Probabilitatea de pierdere a unui bloc BLER (egală cu  $P_T$ ) se determină impunând ca blocul să nu poată fi achitat după cele  $(q+1)$  încercări și este exprimată de relația (49.a); relația (49.b) exprimă BLER pentru cazul în care probabilitățile de retransmisie după fiecare încercare sunt egale.

$$\text{BLER} = \prod_{j=0}^q P_{Rj} \text{ a. ; pt. } P_{R0} = \dots = P_{Rq} = P_R \Rightarrow \text{BLER} = P_R^{q+1}; \text{ b.} \quad (49)$$

- Dacă aplicația impune valoarea  $T_{\text{max}} = T_{\text{max-t}}$ , atunci relația (48) permite determinarea numărului maxim de încercări care pot fi efectuate, ceea ce permite calculul numărului de retransmisii  $q$

- Valoarea maximă a probabilității de retransmisie  $P_{Rj}$  se determină utilizând relația (48.b) ca:

$$P_{Rj} \leq (\text{BLER}_t)^{1/(q+1)} \quad (50)$$

- Valorile maxim admisibile ale probabilității de eroare de bit  $p_b$  sau ale lungimii blocului de date  $L$  se pot determina folosind fie expresia BLER în funcție de  $p_b$  specifică codului folosit sau aproximarea acesteia folosind distribuția binomială data de relația:

$$P_{Rj} \leq 1 - (1 - p_b)^{L+S} \quad (51)$$

a. Dacă lungimea blocului de date  $L$ ,  $\text{BLER}_t$  și  $T_{\text{max}}$  sunt impuse, atunci din (48) se obține valoarea numărului maxim  $q$  de retransmisii permise, din (50) și (51) se determină valoarea  $p_{b-\text{max}}$  și în funcție de aceasta se determină configurațiile (modulație, cod, rată a codării) care asigură valori ale  $p_b$  mai mici decât  $p_{b-\text{max}}$  la SNR-ul din canal; dintre ele se alege configurația care asigură eficiența spectrală  $\beta$  cea mai mare, aceasta asigurând și eficiența maximă a protocolului,  $\eta$ ;

b. Dacă configurația este impusă, datorită debitului constant impus, și  $T_{\text{max}}$  este impus, atunci din  $T_{\text{max}}$  se obține  $q$ , apoi din (51) se obține  $P_{Rj}$ . Pentru valoarea curentă a SNR se determină valoarea  $p_b$ , iar apoi din (51) se determină valoarea maximă  $L_{\text{max}}$  a lungimii blocului pentru care  $P_{Rj}$  va asigura  $\text{BLER} < \text{BLER}_t$ , vezi și (50). Valoarea utilizată nu trebuie scăzută mult sub valoarea obținută pentru a nu scădea eficiența intrinsecă datorită ponderii mai mari a numărului biților de serviciu notat cu  $H$  în cadrul blocului de lungime  $L$ , vezi relațiile (39), (40) din cursul dedicat protocolelor ARQ

- Cu valorile  $P_{Rj}$ ,  $L$  și  $q$  obținute se calculează eficiența protocolului  $\eta$  asigurată de parametrii selectați, iar apoi prin înmulțirea acesteia cu debitul nominal  $D$  se obține valoarea debitului binar efectiv  $\Theta$ .

- Întârzierea medie asigurată se determină cu (47).

- Dacă serviciul impune  $\text{BLER}_t$ ,  $T_{\text{av-t}}$  și, eventual  $T_{\text{max-t}}$ , atunci protocolul trebuie să respecte condițiile:

$$\text{BLER} = \prod_{j=0}^q P_{Rj} < \text{BLER}_t; \quad \text{a.}$$

$$T_{\text{av}} = 2T_f \sum_{j=0}^q (j+1) P_{R(j-1)} (1 - P_{Rj}) = 2T_f \frac{1 - (q+1)P_R^q + qP_R^{q+1}}{1 - P_R} < T_{\text{av-t}}; P_{R(j-1)} = 1 \text{ pt. } j=0 \quad \text{b.} \quad (52)$$

$$T_{\text{max}} = (q+1) \cdot 2 \cdot T_f < T_{\text{max-t}}; \quad \text{c.}$$

- rețineți că impunerea condiției  $P_{Rj} \ll P_{Rj-\text{max}}$  ar face ca probabilitatea de pierdere a unui bloc după  $(q+1)$  încercări să fie  $\text{BLER} \ll \text{BLER}_t$ ; valorile foarte scăzute ale BLER nu sunt semnificative pentru majoritatea aplicațiilor, dar pot duce la scăderi semnificative ale debitului nominal (și ale throughputului) asigurat, datorită utilizării unui cod cu rată mai mică și/sau unei modulații cu mai puțini biți/simbol QAM.

- considerente particulare pentru cele trei tipuri de protocole H-ARQ vor fi discutate la laborator.