Tehnologii de Acces și Transport

Sl. Adrian Florin PĂUN
Dept. Telecomunicații

Tehnologii de Acces și Transport

Punctaj (130%):

- 10% prezența la minim 35% din prelegeri (5 cursuri)
- 30% prezenta laborator (minim 4 lucrări) – referat final
- 20% temă casă - proiect
- 50% examen în sesiune (prezenta obligatorie)

Resurse: www.radio.pub.ro → Master→ TAT

user: msr1_tat, pass: access2018

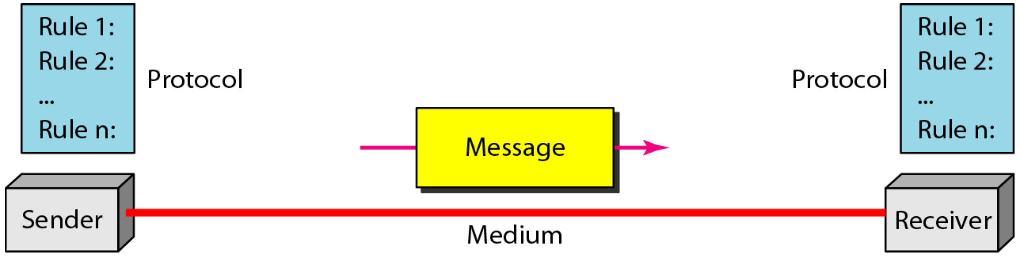
Cuprins

Ch0 - Introducere

- Sistem de transmisiune
- Elemente de teoria informatiei
- Medii de transmisiune
- Tehnici de modulatie
- Tehnici de control al erorii
- Capacitatea canalului de comunicație
- Capacitatea multiutilizator

Sistem de transmisiune

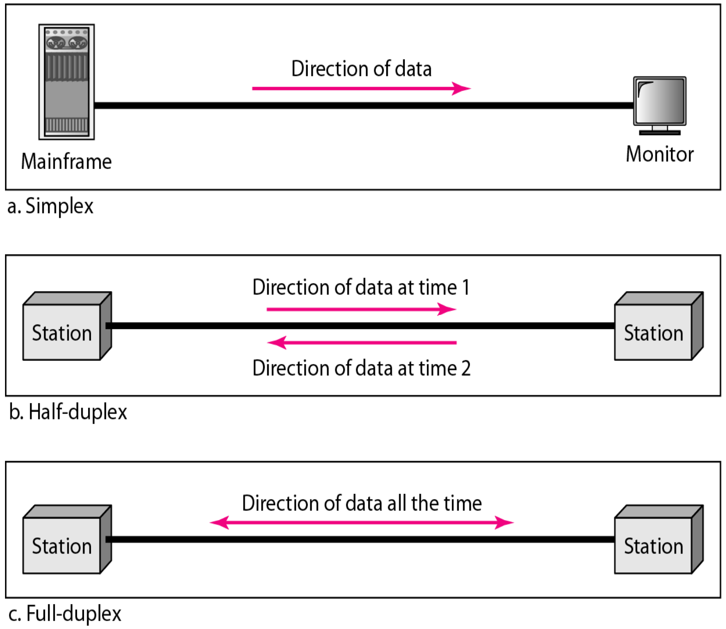
Sistem de transmisiune:



- Emitator
- Receptor
- Cale de transmisiune (mediu de propagare, semnal)
- Mesaj

Tipuri de comunicatii (dupa sens)

- Unidirectionale
- Bidirectionale
  - •Semiduplex
  - •Full-duplex



Tipuri de transmisiuni

Transmisiuni analogice:

- Datele (informatia) analogice sunt transmise in forma analogica (variatie continua)
- Exemple: difuziunea TV si radio analogica, telefonia fixa traditionala

Transmisiuni digitale

- Informatia digitala, reprezentata prin semnal dreptunghiular cu delimitare clara a valorilor este transmisa in banda de baza sau cu urtatoare sinusoidala

Dispozitive de conversie intre forma analogica si digitala:

- Modem: datele digitale sunt transmise in forma analogica
- Codec: datele analogice sunt transmise in forma digitala

Avantajele transmisiunilor digitale

Permite controlul erorii:

- Coduri corectoare de erori (bloc, convolutionale, turbo) - FEC
- Retransmisie (coduri bloc detectoare de erori) – ARQ
- Tehnici hibride FEC + ARQ (pentru canale radio)

Permite o transmisie mai eficienta, mai multe tehnici de multiplexare daca canalul are capacitate mai mare decit transmisiunea (in timp, in frecventa, in spatiu);

Poate asigura securitatea prin criptare

Integrare facila a transmisiunilor de voce, video si date deoarece toate sunt reprezentate digital (aceleasi caracteristici ale senmalului)

Noțiuni de teoria informației - recaitulare

Informatia = ceea ce are sens pentru receptor, într-un context

Comunicatie = transfer de informatie

Masura informatiei – probabilitatea evenimentului:

- Probabilitatea evenimentului x_i este $P(x_i) = P_i$
- Informatia proprie: $I_i \equiv -\log_b P_i \quad (b = 2 \to \text{biti}; \ \ b = \text{e} \to \text{niti})$
- Proprietatile informatiei:

$$\begin{cases} I_i \geq 0, 0 \leq P_i \leq 1 \\ I_i > I_j, P_i < P_j \end{cases} \qquad \begin{cases} P_i = 1, \quad I_i = 0 \\ P_i \to 0, \ \ I_i \to \infty \end{cases}$$

- informatia este cumulativa

$$I_{ij} = \log_b \frac{1}{P_i P_j} = \log_b P_i^{-1} + \log_b P_{ij}^{-1} = I_i + I_j$$

Entropia

Entropia = Valoarea medie a informaţiei unei surse de informaţie

$$\mathcal{S}=\{s_0,s_1,\ldots,s_{K-1}\} \Rightarrow \qquad H(\mathcal{S})=E\{I(s_k)\}=\sum_{k=0}^{K-1} p_k I(s_k)=-\sum_{k=0}^{K-1} p_k \log_2(p_k)$$

Proprietăţile entropiei

are valoare pozitivă, dar este limitată superior: $0\le H(\mathcal{S})\le \log_2 K$

extinderea alfabetului sursei de informaţie creşte entropia sursei:

Exemplu : pentru o sursă cu 4 mesaje echiprobabile, informaţia unui mesaj şi entropia sursei sunt:

$$I_k=\log_2\left(\frac{1}{4}\right)^{-1}=2\,\text{biti} \qquad H(\mathcal{S})=\sum_{k=0}^{3} p_k I(s_k)=-\sum_{k=0}^{3}\frac{2}{4}=2\,\text{biti}$$

Prin gruparea a două mesaje entropia devine

$$H(\mathcal{S}^2)=2H(\mathcal{S})=4\,\text{biti}$$

Informatia Mutuala (Transinformatia)

- Relatie:

$$I(X,Y)=H(X)+H(Y)-H(X,Y)$$

$$I(X,Y)=H(X)-H(X|Y)$$

- unde $H(X|Y)=-\sum_i\sum_j p(x_i,y_j)\log_2\left(p(x_i|y_j)\right)$ este echivocația, măsură a echivocului asupra mesajului emis când se cunoaște mesajul recepționat;

$$I(X,Y)=H(Y)-H(Y|X)$$

- unde $H(Y|X)=-\sum_i\sum_j p(x_i,y_j)\log_2\left(p(y_j|x_i)\right)$ este eroarea medie, măsură a incertitudinii asupra mesajului recepționat când se cunoaște mesajul emis;

Transinformația *I*(*X,Y*) = cantitatea de informație transmisă prin canal → valoarea maximă : **capacitatea canalului**.

Capacitatea canalului

- Capacitatea canalului fără zgomot
- Capacitatea canalului AWGN (Limita Shannon)
- Capacitatea canalului cu fading plat (flat fading)
  - Cu informații despre statistica fadingului
  - Cu fading cunoscut la recepție (Rx)
  - Cu fading cunoscut la emisie (Tx) și recepție (Rx)
- Capacitatea canalului (fix) selectiv în frecvență
- Capacitatea canalului cu fading selectiv în frecvență

Capacitatea canalului AWGN

Capacitatea canalului fara zgomot:

$$C = D_b = 2 \cdot B \cdot \log_2(L)$$

- Debitul binar (bps) D_b
- Banda de frecventa (Hz) - B
- Numarul de nivele ale semnalului - L

Harry Nyquist
(1889-1976)

Capacitatea canalului AWGN (doar zgomot) :

$$r(kT_S) = x(kT_S) + n(kT_S) \quad \rightarrow \quad r_k = x_k + n_k$$

$$C = D_b = B \cdot \log_2(1+\gamma)$$

- Raportul semnal – zgomot $\gamma = \frac{P_S}{P_N} = \frac{P_S}{B \cdot N_0}$
- Puterea medie a semnalului rec. (W) - P_S
- Puterea medie a zgomotului rec. (W) – P_N
- Banda semnalului (Hz) - B

Claude Elwood Shannon
(1916-2001)

Capacitatea canalului AWGN

Th de codare a lui Shannon:

- Daca *R*<*C* atunci exista un cod care asigura transmisia informatiei cu o probabilitate de eroare arbitrar de mica;
- Daca *R*>*C* rata de eroare este intotdeauna *mare* ()

Capacitatea canalului AWGN :

- Capacitatea maximă dintre toate tipurile de canale cu zgomot
- Valoare teoretică (nu poate fi atinsă in parctică)
- Reprezintă o caracteristică a canalului
  - Nu depinde de tehnica de transmisiune utilizată
  - Tehnicile cu rate de transmisie (*R*) apropiate de *C* la SNR mediu si mare: codurile corectoare de erori: LDPC, coduri turbo;

Capacitatea canalului

- Capacitatea canalului fără zgomot
- Capacitatea canalului AWGN (Limita Shannon)
- Capacitatea canalului cu fading plat (flat fading)
  - Cu informații despre statistica fadingului
  - Cu fading cunoscut la recepție (Rx)
  - Cu fading cunoscut la emisie (Tx) și recepție (Rx)
- Capacitatea canalului (fix) selectiv în frecvență
- Capacitatea canalului cu fading selectiv în frecvență

Capacitatea canalului cu fading plat (flat fading)

- Rata maximă a informației care poate fi transmisă prin canalul cu fading neselectiv și cu zgomot aditiv (AWGN)
- Depinde de informația cunoscută despre canal (doar statistica canalului sau starea lui de la momentul transmisiei):

(CSI = Channel State Information)

- Informația despre distribuția canalului
  - Dificil de obținut capacitatea într-o formă compactă
- CSI la recepție
  - Statistica fadingului este cunoscută la Tx și Rx dar funcția

pondere este cunoscută doar la Rx: **Capacitatea Ergodică** (canale cu fading rapid); **Capacitate canalului cu blocare** (canale cu fading lent)

- CSI la Tx și Rx
  - Atât statistica fadingului cât și funcția pondere sunt cunoscute și la Tx și la Rx

Capacitatea Ergodică a canalului

- **Capacitatea ergodică** (Shannon)

  • Pentru canale cu fading plat **rapid** (**fast flat fading**) unde lungimea

cuvântului de cod (simbolul) transmis este mai mare decit timpul de coerentă al canalului. (pe durata cuvintului de cod, canalul trece prin toate *stările posibile ale lui*)

$$C = E\left\{B \cdot \log_2\left(1+\gamma\right)\right\} = \int_0^{+\infty} B \cdot \log_2\left(1+\gamma\right) \cdot p\left(\gamma\right) \mathrm{d}\gamma$$

- Aplicând inegalitatea Jensen: $E\left\{f\left(x\right)\right\} \leq f\left(E\left\{x\right\}\right)$
- Capacitatea ergorică aunui canal cu fading nu poate fi mai bună decât capacitatea unui canal AWGN cu același SNR mediu

$$E\left\{B \cdot \log_2\left(1+\gamma\right)\right\} \leq B \cdot \log_2\left(1+E\left\{\gamma\right\}\right) = B \cdot \log_2\left(1+\overline{\gamma}\right)$$

Capacitatea canalului cu blocare

- **Capacitatea canalului cu blocare** (întrerupere)
  - Canale cu fading plat **lent** (**slow flat fading**)
  - Lungimea cuvântului de cod (simbolul) transmis este mai mică decit timpul de coerentă al canalului
  - probabilitatea nenulă ca pe toată durata transmisiunii cuvântului de cod funcția pondere să fie **foarte mică** (nulă) – *deep fading*
  - Codarea nu mai poate reface informația (toate simbolurile codului au fost afectate de *anulare*)
  - Capacitatea ergodică nulă pentru canalele cu fading plat lent (quasi-static)
  - Este imposibil să se obțină o transmisiune (statistic) fără erori, indiferent de rata de transmisie
  - **Capacitatea cu întrerupere** (outage capacity) – caracterizează capacitatea de a transmite informație prin aceste canale.

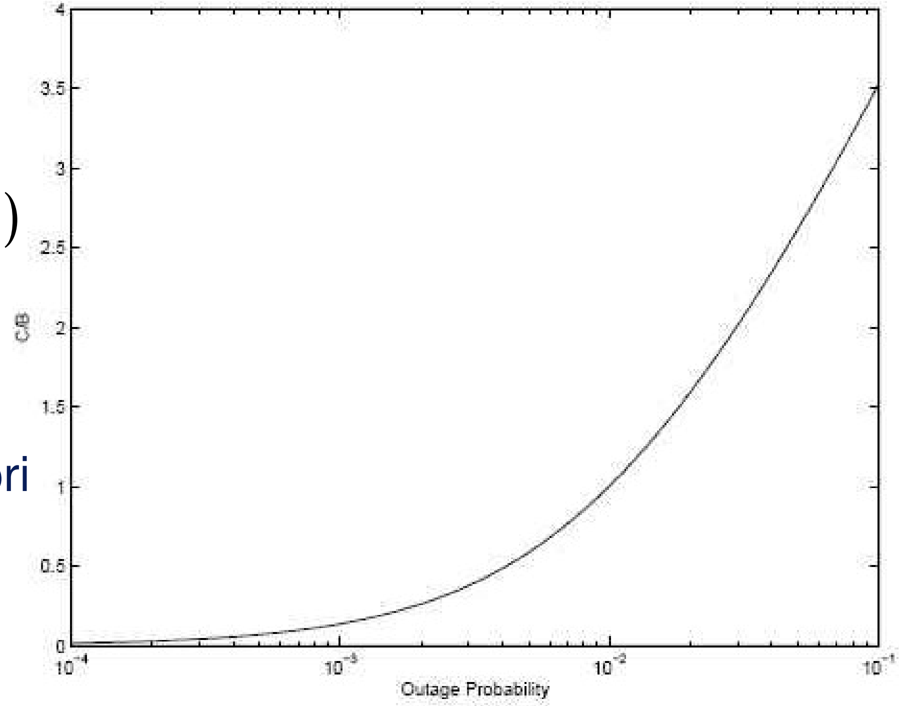
Capacitatea canalului cu blocare

- Capacitatea cu blocare (întrerupere)
  - Rata maximă de transmisie cu o probabilitate de eroare maximă acceptată (probabilitate de întrerupere/blocare)
  - Permite datelor codate să fie decodate corect dacă nu este o situație de *deep fading* pe canal
  - ε probabilitatea de blocare

atunci **Capacitatea cu întrerupere** este:

$$C_\varepsilon = B \cdot \log_2\left(1 + F^{-1}(\varepsilon)\right) = B \cdot \log_2\left(1 + \gamma_{\min}\right)$$

$$\varepsilon = \Pr\left(\gamma < \gamma_{\min}\right) = F\left(\gamma_{\min}\right)$$



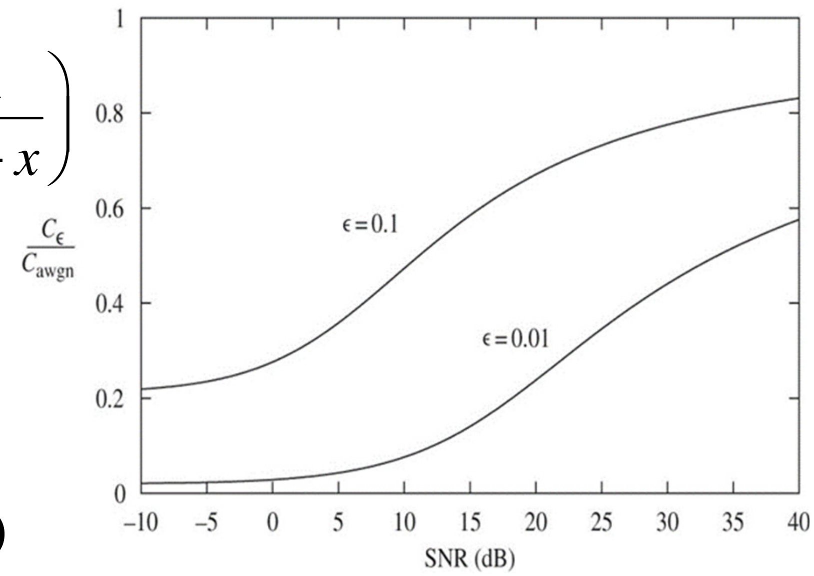
  - Rata medie de transmisie fără erori

$$\left(1-\varepsilon\right)C_\varepsilon = \left(1-\varepsilon\right)B \cdot \log_2\left(1+\gamma_{\min}\right)$$

Capacitatea canalului cu blocare

- Marginea de fading = SNR suplimentar pentru canal cu fading lent, plat, cu aceeași rata binară ca a unui canal AWGN.
- Exp: canal cu fading Rayleigh

$$F(x) = \Pr(\gamma < x) = 1 - e^{\frac{-x}{\overline{\gamma}}} \Leftrightarrow F^{-1}(x) = \overline{\gamma} \ln\left(\frac{1}{1-x}\right)$$



- Cu prob. de blocare *ε*, capacitatea:

$$C_\varepsilon = B \log(1 + F^{-1}(\varepsilon)) = B \log\left(1 + \overline{\gamma} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right)\right)$$

- Capacitatea canalului AWGN

$$C_{AWGN} = B \log_2(1 + \overline{\gamma})$$

- Este necesar un SNR suplimentar $10\log_{10}\left[1/\ln\left(1/\left(1-\varepsilon\right)\right)\right]$ la canalul cu fading Rayleigh pentru o rată a informației egală cu un canal AWGN

- Exp: pentru *ε*=0.01 este necesară o **margine de fading** de 20dB!

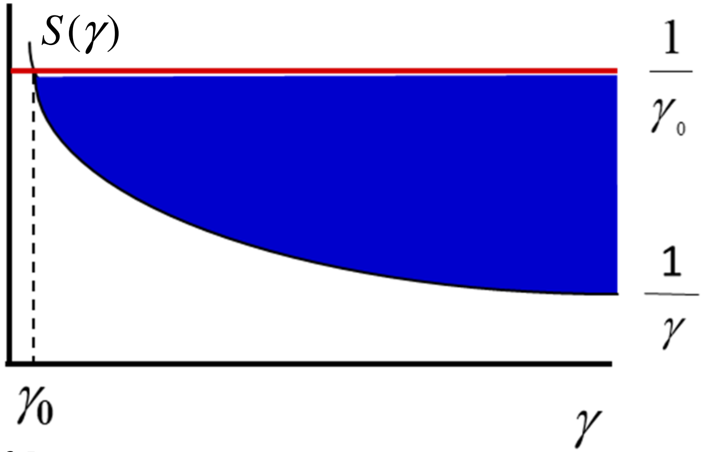
Capacitatea cu CSI cunoscute la Tx și Rx

- Capacitatea pentru CSI cunoscute la Tx și Rx și putere fixă de transmisie este similar cu CSI cunoscut doar la Rx;
- Tehnici de îmbunătățire a capacității pentru putere variabilă la emisie:
  - Puterea de emisie adaptată in funcție de γ
  - Inversia canalului
- Adaptarea puterii de emisie

$$C = \max_{S(\gamma):E[S(\gamma)]=\bar{S}} \int_0^\infty B\log_2\left(1+\frac{\gamma S(\gamma)}{\bar{S}}\right)p(\gamma)d\gamma$$

- Adaptarea puterii cu tehnica *waterfilling*

$$\frac{S(\gamma)}{\bar{S}} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_0}-\frac{1}{\gamma} & \gamma \geq \gamma_0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



- Capacitatea totală $\frac{R}{B} = \int_{\gamma_0}^\infty \log_2\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)p(\gamma)d\gamma.$

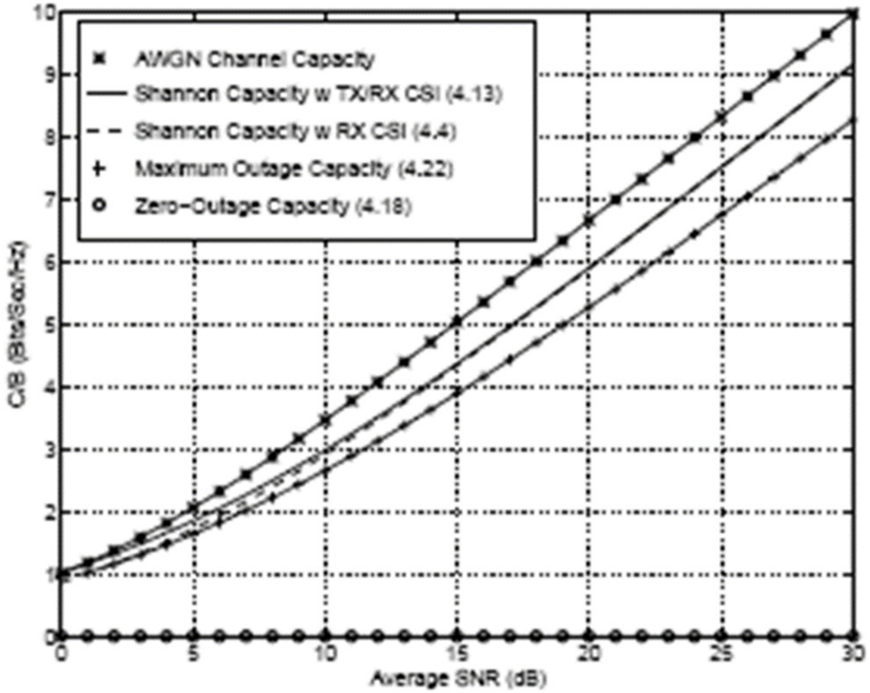
Capacitatea cu CSI cunoscute la Tx și Rx

- Inversia canalului
  - se inversează fadingul pentru a menține constant SNR-ul
  - proiectare simplă pentru rate fixe
  - reduce capacitatea spre zero
    - Capacitatea devine zero pentru canale cu fading Rayleigh
  - Tehnica inversiei trunchiate
    - se inversează canalul doar dacă fadingul este peste un prag
    - SNR constant (rată fixă) pentu fading peste prag
    - Utilizarea pragului de fading crește semnificativ capacitatea
      - Asimptotic se poate ajunge la valoarea optimă

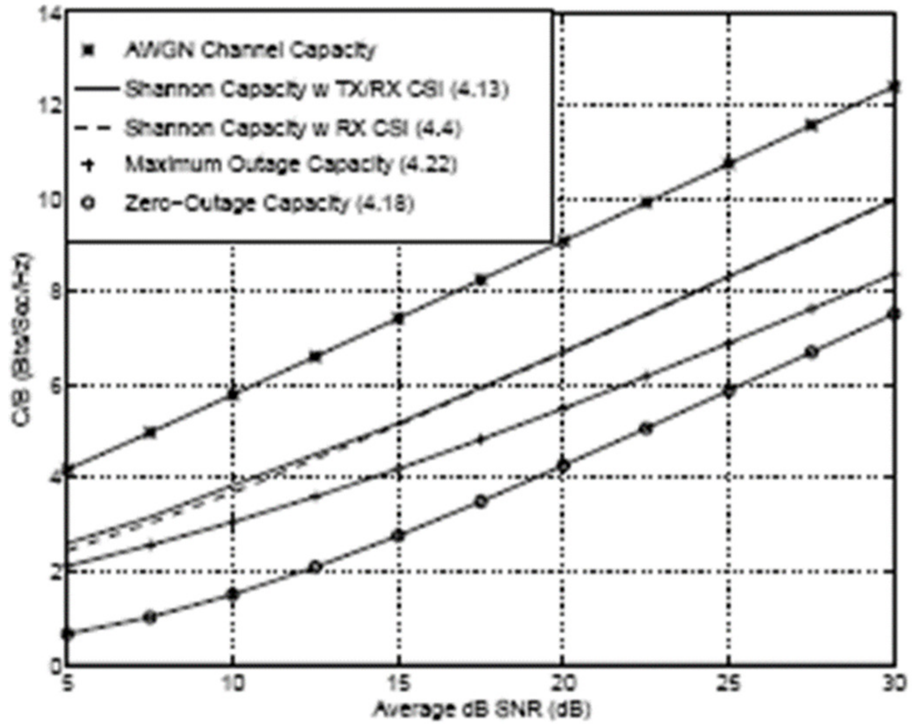
Capacitatea canalului cu fading plat

- Fading rapid (Rayleigh) și fading lent (Log-normal)

Rayleigh



Log-Normal

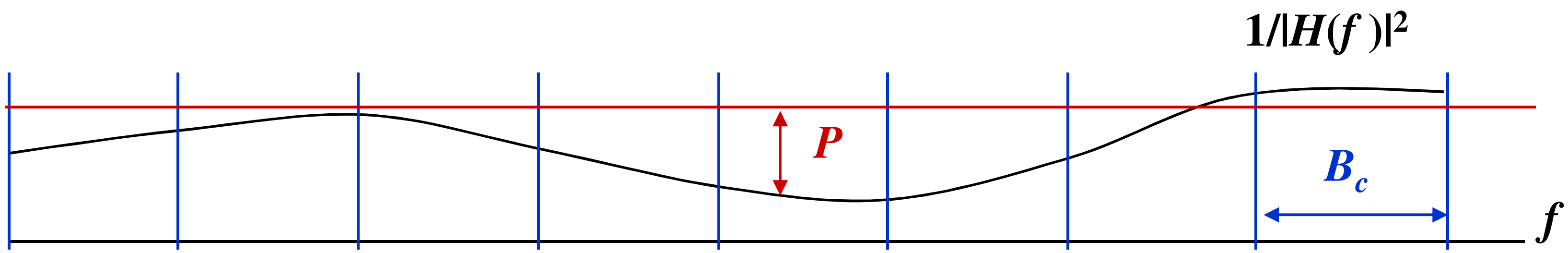


Capacitatea canalului

- Capacitatea canalului fără zgomot
- Capacitatea canalului AWGN (Limita Shannon)
- Capacitatea canalului cu fading plat (flat fading)
  - Cu informații despre statistica fadingului
  - Cu fading cunoscut la recepție (Rx)
  - Cu fading cunoscut la emisie (Tx) și recepție (Rx)
- Capacitatea canalului (fix) selectiv în frecvență
- Capacitatea canalului cu fading selectiv în frecvență

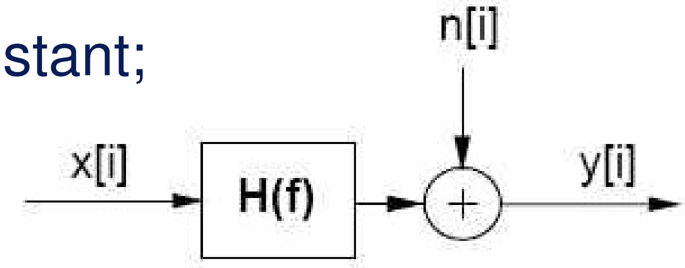
Capacitatea canalului selectiv in frecvență

- Pentru canale invariante (în timp) capacitatea este obținută cu algoritmul *water-filling* in frecvență;
- Pentru canale variabile, capacitatea nu este cunoscută;
- Evaluare aproximativă prin divizare în sub-benzi
  - fiecare sub-bandă ale lărgimea B_C
  - Fading independent in fiecare sub-bandă
  - Capacitatea este suma capacităților din fiecare sub-bandă



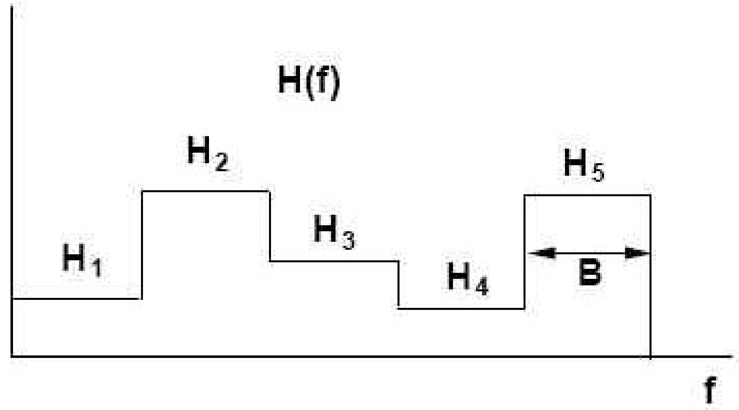
Capacitatea canalului selectiv in frecvență

- Canalul selectiv in frecvență este divizat în N_C canale paralele, fiecare cu câștig constant;
- Fiecare canal "*flat*" este un canal AWGN echivalent cu câștigul H_i ;
- Capacitatea canalului (presupunând H_i cunoscut la Tx și Rx)



$$C = \max_{\{P_1, P_2, \cdots P_{N_c}\}} \sum_{j=1}^{N_c} B \log\left(1 + \frac{|H_j|^2 P_j}{N_0 B}\right)$$

$$\text{conditionat de } \sum_{j=1}^{N_c} P_j \leq P$$



Tehnica Water-Filling

- Soluția: alocarea optimă a puterii:

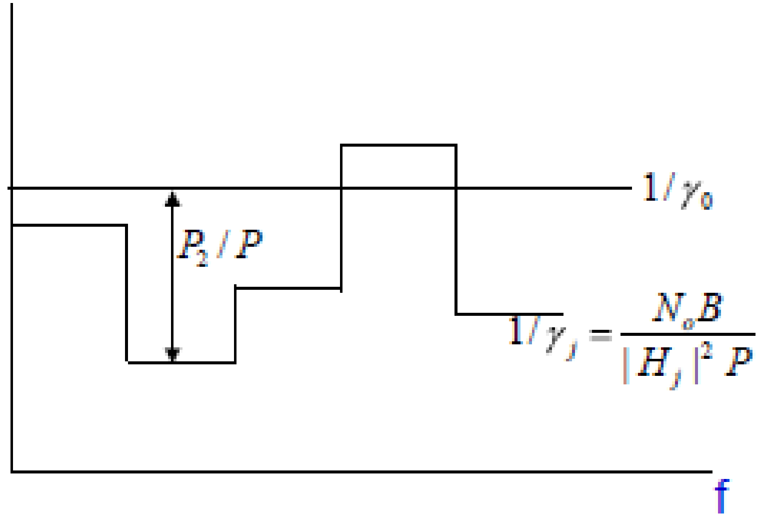
$$P_j = \begin{cases} P(1/\gamma_0 - 1/\gamma_j) & \gamma_j \geq \gamma_0 \\ 0 & \gamma_j < \gamma_0 \end{cases}$$

- Unde $\gamma_j = \left|H_j\right|^2 P/(N_0 B)$ este

SNR al canalului *j* cu puterea *P*;

γ_0 este multiplicatorul Lagrange ales astfel încât:

$$\sum_{j=1}^{N_c} P_j = P \Leftrightarrow \sum_{j=1}^{N_c} \left(1/\gamma_0 - 1/\gamma_j\right) = 1$$



Se alocă mai multă putere canalelor mai bune

- Cu alocarea *optimă* a puterii,capacitatea devine:

$$C = \sum_{j:\gamma_j \geq \gamma_0}^{N_c} B \log(\gamma_j/\gamma_0)$$

Capacit. canalului cu fading continuu selectiv in frecvență

- Dacă $H(f)$ este continuă (sau nu poate fi divizată în canale paralele), se poate obține un algoritm *water-filling* continuu
- Capacitatea canalului este:

$$C = \max_{P(f):\int P(f)df \le P} \int \log_2\left(1+\frac{|H(f)|^2 P(f)}{N_0}\right) df$$

- Utilizând multiplicatorul Lagrange se obține un algoritm *water-filling* pentru alocarea continuă a puterii în frecvență:

$$\frac{P(f)}{P} = \begin{cases} 1/\gamma_0 - 1/\gamma(f) & \gamma(f) \ge \gamma_0 \\ 0 & \gamma(f) < \gamma_0 \end{cases}$$

$$\text{unde} \quad \gamma(f) = |H(f)|^2 P / N_0$$

- Capacitatea totală a canalului devine:

$$C = \int_{f:\gamma(f)\ge\gamma_0} \log_2\left(\frac{\gamma(f)}{\gamma_0}\right) df$$

Canalul cu fading selectiv in frecvență variabil în timp

- Canalul cu fading selectiv in frecvență variabil în timp poate fi divizat în frecvență în N_C subcanale, fiecare cu banda de coerență B_C.
- Fiecare canal se aproximează ca independent cu fading flat
- Capacitatea totală este aprox. suma capacității tuturor subcanalelor cu constrângerea ca suma puterii de emisie din toate canalele să fie constantă
- Capacitatea Shannon totală optimizată cu tehnica water-filling

$$C = \sum_{j=1}^{N_c} \int_{\gamma_0}^{\infty} B_c \log(\gamma_j / \gamma_0) p(\gamma_j) \mathrm{d}\gamma_j$$

unde γ_0 se obtine din relatia

$$\sum_{j=1}^{N_c} \int_{\gamma_0}^{\infty} \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_j} \right) p(\gamma_j) \mathrm{d}\gamma_j = 1$$