

Curs 10

Protocoale de cooperare de bază.

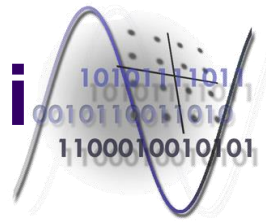
Tehnici MIMO distribuite.

Zsolt Polgar

Communications Department
Faculty of Electronics and
Telecommunications,
Technical University of Cluj-Napoca



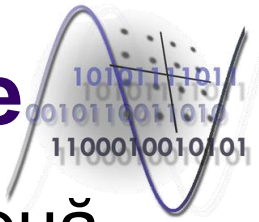
Conținutul cursului



- Protocoale de cooperare – aspecte generale.
- Protocoale de cooperare fixe – performanțe.
- Protocoale de cooperare adaptive – performanțe.
- Aspecte legate de semnalizare.
- Tehnici de multiantenă (MIMO) – caracterizare generală.
- Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit).

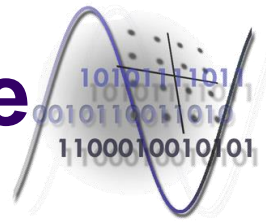
- Referințe:
 - J. Nicholas Laneman, David N.C. Tse, Gregory W. Wornell, “Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior”, IEEE Trans. Information Theory, January, 2002.

Protocoloale de cooperare

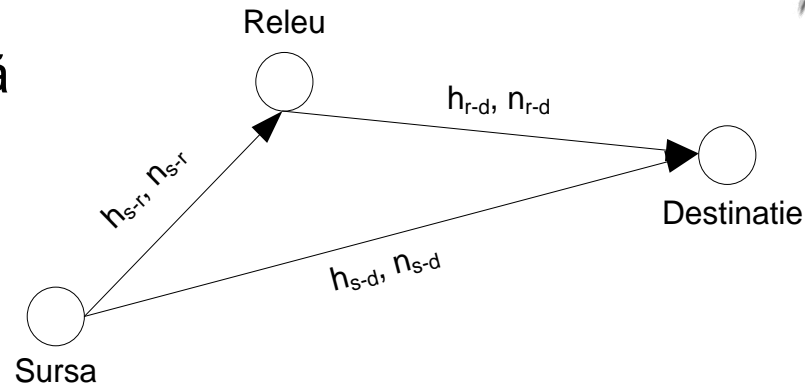


- Protocoloalele de cooperare includ de regulă două etape separate (“ortogonale”):
 - Releul trebuie să recepționeze și să proceseze datele înainte de a le putea transmite;
 - Recepția și transmisia trebuie să fie separate pentru a se evita interferența celor două semnale:
 - Se utilizează de regulă o operare semi-duplex;
 - Are ca și efect reducerea eficienței spectrale (practic scade la jumătate); se introduce o întârziere suplimentară, egală cu o etapă;
 - Cu tehnici avansate de antenă se poate realiza separarea celor două transmisii – faza de recepție a unei etape se suprapune cu faza de transmisie (releu) a etapei anterioare;
 - Se poate mări eficiența spectrală (practic se poate dubla); are loc menținerea întârzierii de o etapă de cooperare;
 - Separarea celor două etape se poate realiza și în frecvență, dar este necesară extinderea benzii de frecvență;

Protocoloale de cooperare



- Schema de cooperare de bază

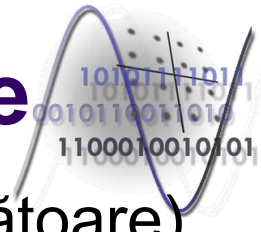


- Etapa I: sursa transmite informația către destinație pe canalul sursă-destinație. Această informație este recepționată și de releu, pe canalul sursă-releu:

$$\begin{aligned} y_{s-d} &= \sqrt{P} \cdot h_{s-d} \cdot x + n_{s-d} \\ y_{s-r} &= \sqrt{P} \cdot h_{s-r} \cdot x + n_{s-r} \end{aligned} \quad (1)$$

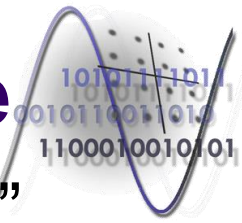
- h_{s-d} și h_{s-r} reprezintă câștigul canalelor sursă – destinație și sursă – releu, P reprezintă puterea de emisie, iar n_{s-d} și n_{s-r} reprezintă zgomotul aditiv pe canale sursă – destinație și sursă – releu;

Protocoloale de cooperare



- Etapa II: releu trimite informație suplimentară (ajutătoare) destinației pe canalul releu-destinație:
 - h_{r-d} reprezintă câștigul canalului releu – destinație, P reprezintă puterea de emisie a releului, iar n_{r-d} reprezintă zgomotul aditiv pe canalul releu – destinație;
$$y_{r-d} = \sqrt{P} \cdot h_{r-d} \cdot x + n_{r-d}$$
 - Se consideră că zgomotul aditiv este identic pe toate cele 3 canale implicate în transmisia cooperativă; canalele sunt afectate de fading plat de tip Rayleigh, independent pe fiecare canal;
- Protocoloalele de cooperare pot fi clasificate în funcție de modul în care sunt împărțite resursele între sursă și releu:
 - Protocoloale de cooperare fixe:
 - Resursele alocate releului și sursei sunt fixe;
 - Protocoloale de cooperare adaptive:
 - Resursele alocate releului și sursei se modifică pe durata transmisiiei în funcție de performanțele obținute, pentru a eficientiza utilizarea resurselor radio;

Protocoloale de cooperare fixe



- Protocolul de cooperare “Amplify and Forward” (Amplifică și Retransmite);
 - În cazul protocolului AF releul doar scalează și retransmite semnalul recepționat de la sursă în prima fază a cooperării;
 - Semnalul recepționat de releu și destinație în prima fază a cooperării este dat de (1); releul scalează semnalul recepționat cu un coeficient de scalare β ;
 - Parametrul β este impus de constrângerile de putere de la releu:

$$\beta = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P \cdot |h_{s-r}|^2 + N_0}}$$

- Semnalul recepționat de destinație de la releu este:

$$\begin{aligned} y_{r-d} &= \beta \cdot h_{r-d} \cdot y_{s-r} + n_{r-d} \\ &= \beta \cdot h_{r-d} \cdot h_{s-r} \cdot \sqrt{P} \cdot x + \underbrace{\beta \cdot h_{r-d} \cdot n_{s-r} + n_{r-d}}_{n'_{r-d}} \end{aligned}$$

Protocoloale de cooperare fixe



- Cele două replici ale semnalului, cea de pe calea directă și cea prin releu pot fi combinate cu oricare dintre tehnicile de combinare (discutate în curs 4);

- Se consideră că se utilizează combinarea MRC:

$$y_{MRC} = w_{s-d} \cdot y_{s-d} + w_{r-d} \cdot y_{r-d}$$

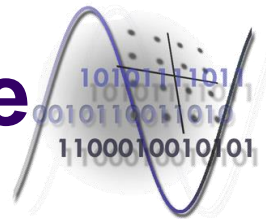
- Dacă coeficienții de ponderare sunt aleși să maximizeze raportul semnal-zgomot corespunzător semnalului combinat, raportul semnal-zgomot instantaneu se scrie: $\rho_{MRC} = \rho_{s-d} + \rho_{r-d}$

- Probabilitatea de outage se poate exprima din punct de vedere al capacității canalului, pornind de la definiția legată de SNR (vezi cursul 4 – canale radio/diversitate);

- C reprezintă capacitatea clasică a canalelor; C_{th} – reprezintă o capacitate de prag;

$$\begin{aligned} P_{outage}^{\Gamma} &= P_{\Gamma}(\rho_{th}) = P(\Gamma \leq \rho_{th}) = P(\Gamma \leq 2^{C_{th}} - 1) = P(\Gamma + 1 \leq 2^{C_{th}}) \\ &= P(C \leq C_{th}) = P_C(C_{th}) = P_{outage}^C \end{aligned}$$

Protocoloale de cooperare fixe



- Informația mutuală se scrie ca [Laneman]:

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \cdot \log_2 (1 + \rho_{s-d} + \rho_{r-d})$$
$$= \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P \cdot |h_{s-d}|^2}{N_0} + f \left(\frac{P \cdot |h_{s-r}|^2}{N_0}, \frac{P \cdot |h_{r-d}|^2}{N_0} \right) \right)$$

- unde: $f(x, y) = \frac{x \cdot y}{x + y + 1}$; puterea sursei și a releului se consideră identice și egale cu P; funcția $f(x, y)$ este legată de param. β ;

- Condiția de outage:

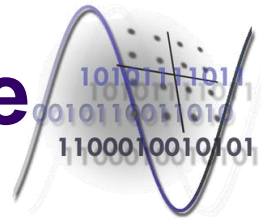
$$I_{AF} < C_{th}$$
$$\frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P \cdot |h_{s-d}|^2}{N_0} + f \left(\frac{P \cdot |h_{s-r}|^2}{N_0}, \frac{P \cdot |h_{r-d}|^2}{N_0} \right) \right) < C_{th}$$

$$\frac{P \cdot |h_{s-d}|^2}{N_0} + f \left(\frac{P \cdot |h_{s-r}|^2}{N_0}, \frac{P \cdot |h_{r-d}|^2}{N_0} \right) < 2^{2 \cdot C_{th}} - 1$$

$$|h_{s-d}|^2 + \frac{1}{P/N_0} \cdot f \left(\frac{P \cdot |h_{s-r}|^2}{N_0}, \frac{P \cdot |h_{r-d}|^2}{N_0} \right) < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}$$

- factorul 1/2 este legat de cele două faze ale cooperării;

Protocoloale de cooperare fixe



- Probabilitatea de outage se calculează astfel (valabilă pentru rapoarte semnal-zgomot mari) [Laneman]:

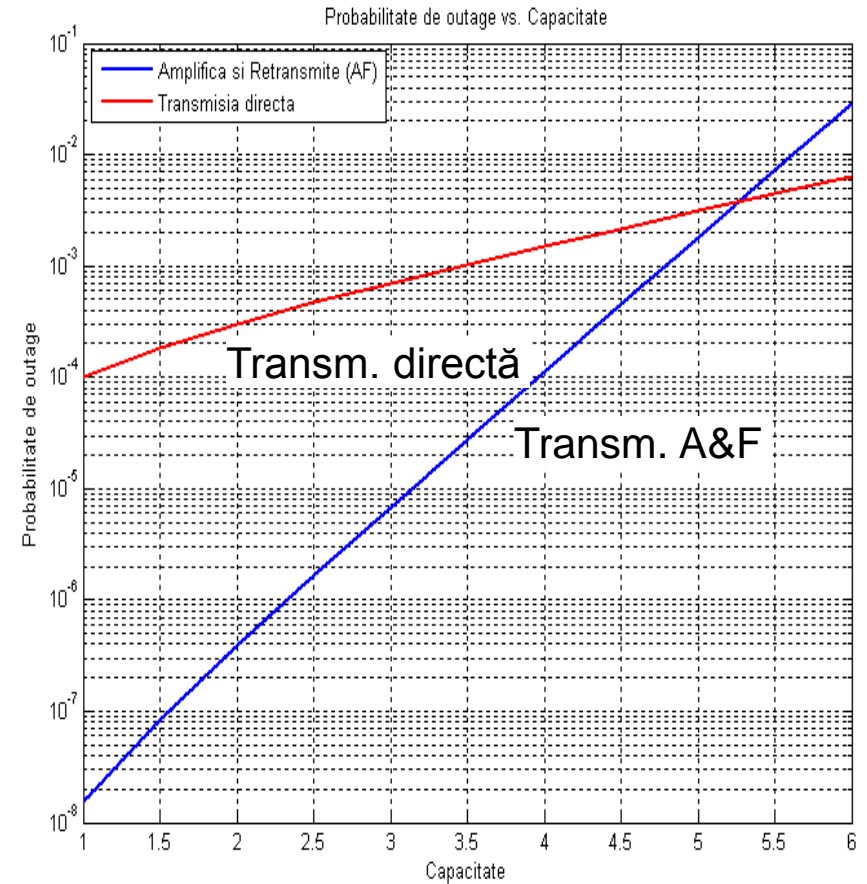
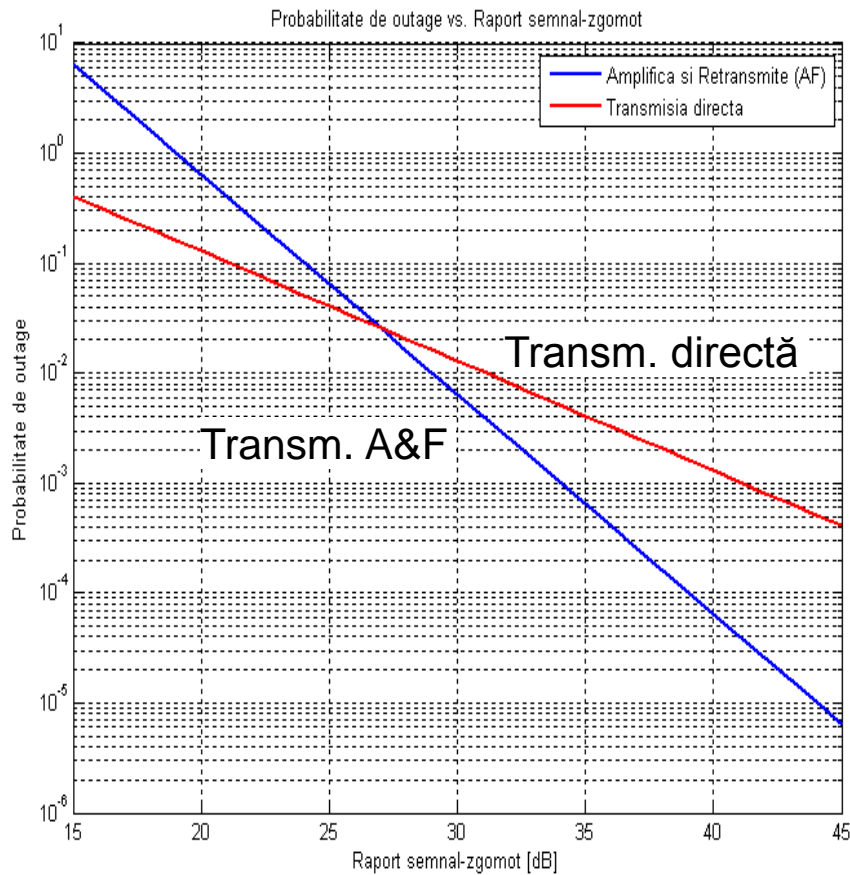
$$\begin{aligned} \left(\frac{P / N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \right)^2 \cdot P_{outage}^{C_{th}} &= \left(\frac{P / N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \right)^2 \cdot P(I_{AF} < C_{th}) \\ &\approx \lim_{P/N_0 \rightarrow \infty} \left(\frac{P / N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \right)^2 \cdot P \left(|h_{s-d}|^2 + \frac{1}{P / N_0} \cdot f \left(\frac{P \cdot |h_{s-r}|^2}{N_0}, \frac{P \cdot |h_{r-d}|^2}{N_0} \right) < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0} \right) \\ &\approx \frac{1}{2 \cdot \sigma_{s-d}^2} \cdot \frac{\sigma_{s-r}^2 + \sigma_{r-d}^2}{\sigma_{s-r}^2 \cdot \sigma_{r-d}^2} \quad (\text{rezulta din [Laneman, Claim 1]}) \\ \Rightarrow P_{outage}^{C_{th}} &\approx \left(\frac{1}{2 \cdot \sigma_{s-d}^2} \cdot \frac{\sigma_{s-r}^2 + \sigma_{r-d}^2}{\sigma_{s-r}^2 \cdot \sigma_{r-d}^2} \right) \cdot \left(\frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0} \right)^2 \quad (\text{rapoarte semnal zgomot ridicate}) \end{aligned}$$

- unde σ_{s-d} , σ_{s-r} și σ_{r-d} reprezintă deviațiile standard ale anvelopei funcției de transfer a canalelor afectate de fading implicate în transmisia cooperativă;

Protocoloale de cooperare fixe



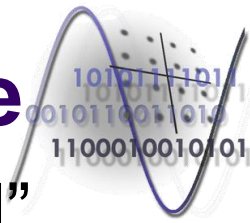
- Probabilitatea de outage funcție de SNR și capacitate canal:



- capacitate de prag: $C_{th} = 3.8$;

- valoare SNR: 40dB;

Protocoloale de cooperare fixe



- Protocolul de cooperare “Decode and Forward” (Decodează și Retransmite)
 - În cazul protocolului DF releul decodează datele recepționate de la sursă, le reencodează utilizând același cod de canal și le trimite destinației pe canalul r-d;
 - Deoarece protocolul impune ca atât destinația cât și releul să decodeze corect datele, informația mutuală medie maximă se scrie:

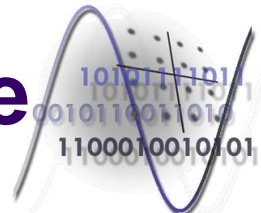
$$I_{DF} = \frac{1}{2} \cdot \min \left(\log_2 \left(1 + |h_{s-r}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right), \log_2 \left(1 + |h_{s-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} + |h_{r-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right) \right)$$

$$I_{DF} < C_{th}$$

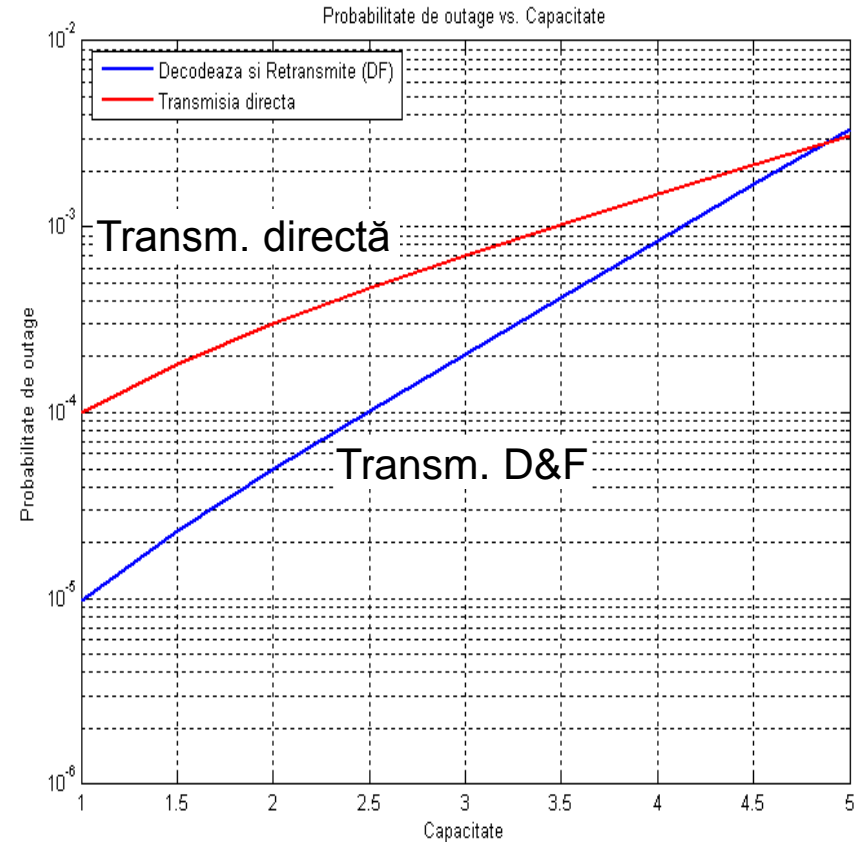
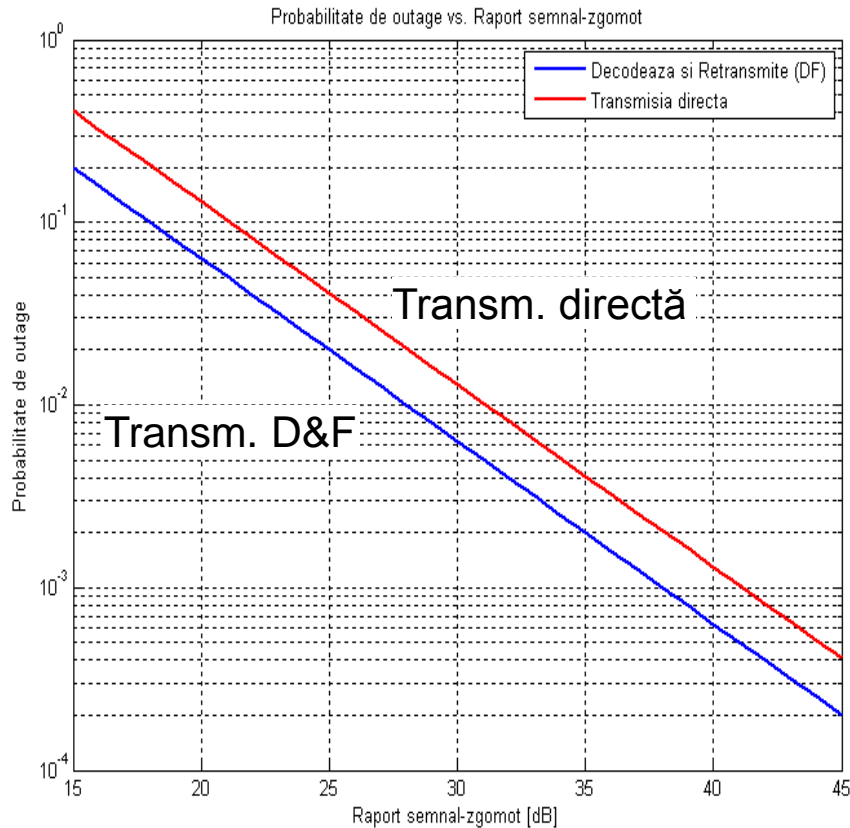
- Evenimentul de outage:

$$\min \left(|h_{s-r}|^2, |h_{s-d}|^2 + |h_{r-d}|^2 \right) < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0}$$

Protocoloale de cooperare fixe



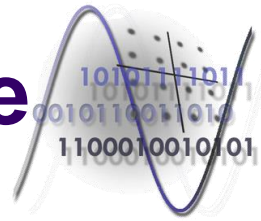
- Probabilitatea de outage: $P_{outage}^{C_{th}} = P(I_{DF} < C_{th}) \approx \frac{1}{\sigma_{s-r}^2} \cdot \left(\frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0} \right)$ (rapoarte semnal/zgomot ridicate)



- capacitate de prag: $C_{th} = 3.8$;

- valoare SNR: 40dB;

Protocoloale de cooperare fixe

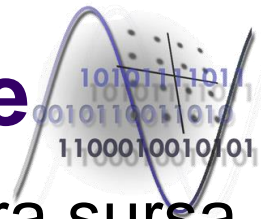


- Explicații legate de calculul probabilității de outage:

$$P(I_{DF} < C_{th}) = P\left(|h_{s-r}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right) + P\left(|h_{s-r}|^2 \geq \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right) \cdot P\left(|h_{s-d}|^2 + |h_{r-d}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right)$$

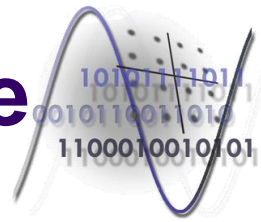
$$\begin{aligned} \frac{P/N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \cdot P_{outage}^{C_{th}} &= \frac{P/N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \cdot P(I_{DF} < C_{th}) \approx \underbrace{\lim_{P/N_0 \rightarrow \infty} \left(\frac{P/N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \cdot P\left(|h_{s-r}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right) \right)}_{1/\sigma_{s-r}^2} + \\ &+ \underbrace{\lim_{P/N_0 \rightarrow \infty} \left(P\left(|h_{s-r}|^2 \geq \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right) \right)}_0 \cdot \underbrace{\lim_{P/N_0 \rightarrow \infty} \left(\frac{P/N_0}{2^{2 \cdot C_{th}} - 1} \cdot P\left(|h_{s-d}|^2 + |h_{r-d}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0}\right) \right)}_0 \end{aligned}$$

Protocoloale de codare adaptive



- Se utilizează doar transmisia directă dacă legătura sursa – releu este sub anumit prag;
- Există diferite posibilități de utilizare a legăturii directe în această situație:
 - Transmisia simplă pe legătura directă;
 - Modificarea codării pe legătura directă, etc;
- Protocolul de cooperare “Adaptive Decode and Forward”
 - Pentru a îmbunătăți performanțele protocolului DF releul va fi folosit doar dacă canalul sursa releu este suficient de bun;
 - Dacă condițiile canalului sursa-releu sunt peste un anumit prag protocolul va funcționa similar cu protocolul fix DF;
 - Dacă condițiile canalului sursă-releu sunt sub un anumit prag protocolul va utiliza legătura directă în ambele faze de cooperare (“repetition coding”);

Protocoloale de codare adaptive



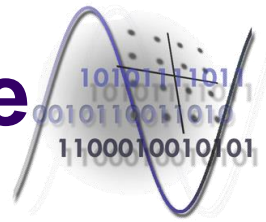
- Expresia capacității canalului pentru cele două moduri de lucru:

$$I_{ADF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \log \left(1 + 2 \cdot |h_{s-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right), & |h_{s-r}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0} \\ \frac{1}{2} \cdot \log \left(1 + |h_{s-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} + |h_{r-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right), & |h_{s-r}|^2 \geq \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0} \end{cases}$$

- Alegerea pragului de activare a modului de lucru:
 - Limitarea capacității canalului cooperativ provine de la legătura sursă – releu; releul este utilizat doar dacă capacitatea pe legătura sursă – releu este mai mare decât un anumit prag;

$$\begin{aligned} C_{s-r} &\geq C_{th} \\ \log \left(1 + |h_{s-r}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right) &\geq C_{th} \\ |h_{s-r}|^2 &\geq \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P / N_0} \end{aligned}$$

Protocoloale de codare adaptive



- Definirea evenimentului de “outage”:

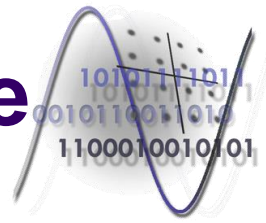
$$I_{ADF} < C_{th}$$
$$\left(\left(|h_{s-r}|^2 < \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0} \right) \wedge \left(\frac{1}{2} \cdot \log \left(1 + 2 \cdot |h_{s-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right) < C_{th} \right) \right) \vee$$
$$\vee \left(\left(|h_{s-r}|^2 \geq \frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0} \right) \wedge \left(\frac{1}{2} \cdot \log \left(1 + |h_{s-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} + |h_{r-d}|^2 \cdot \frac{P}{N_0} \right) < C_{th} \right) \right)$$

- Definirea probabilității de “outage”:

- Situație asemănătoare cu cea de la protocolul AF;

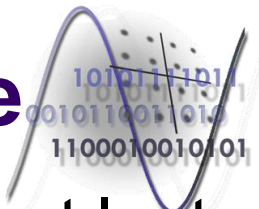
$$P_{outage}^{C_{th}} = P(I_{ADF} < C_{th}) \approx \frac{\sigma_{s-r}^2 + \sigma_{r-d}^2}{2 \cdot \sigma_{s-d}^2 \cdot \sigma_{s-r}^2 \cdot \sigma_{r-d}^2} \cdot \left(\frac{2^{2 \cdot C_{th}} - 1}{P/N_0} \right)^2$$

Aspecte legate de semnalizare



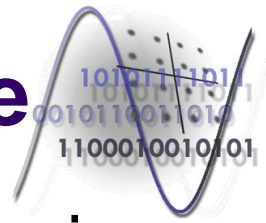
- Implementarea cooperării (a combinării semnalelor la destinație) necesită achiziția și raportarea CSI la sursă și/sau la releu;
 - Pe baza acestor informații se construiește NSI și se alocă resursele radio;
- Procesarea informațiilor CSI se poate realiza în două feluri:
 - Centralizat – toate deciziile sunt luate de BS:
 - Avantaje: simplitate atât în terminalul utilizator cât și în releu;
 - Dezavantaj: este necesară bandă suplimentară pentru operațiile de semnalizare;

Aspecte legate de semnalizare



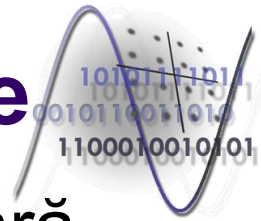
- Descentralizat – în această abordare deciziile sunt luate de către terminale (utilizator și releu);
 - Avantaj: utilizare mai eficientă a benzii;
 - Dezavantaj: complexitate crescută;
- Hibridă – în această abordare deciziile sunt împărțite între terminale și BS;
- În funcție de cât de des trebuie procesat CSI avem:
 - Procesare continuă – pentru trafic mare, canale afectate de fading lent și pentru scheme de codare distribuită;
 - Procesare la cerere – CSI (NSI) procesat numai când este necesar – trafic redus și canale cu fading rapid;
 - Procesare hibridă – pentru trafic intermitent;

Aspecte legate de semnalizare

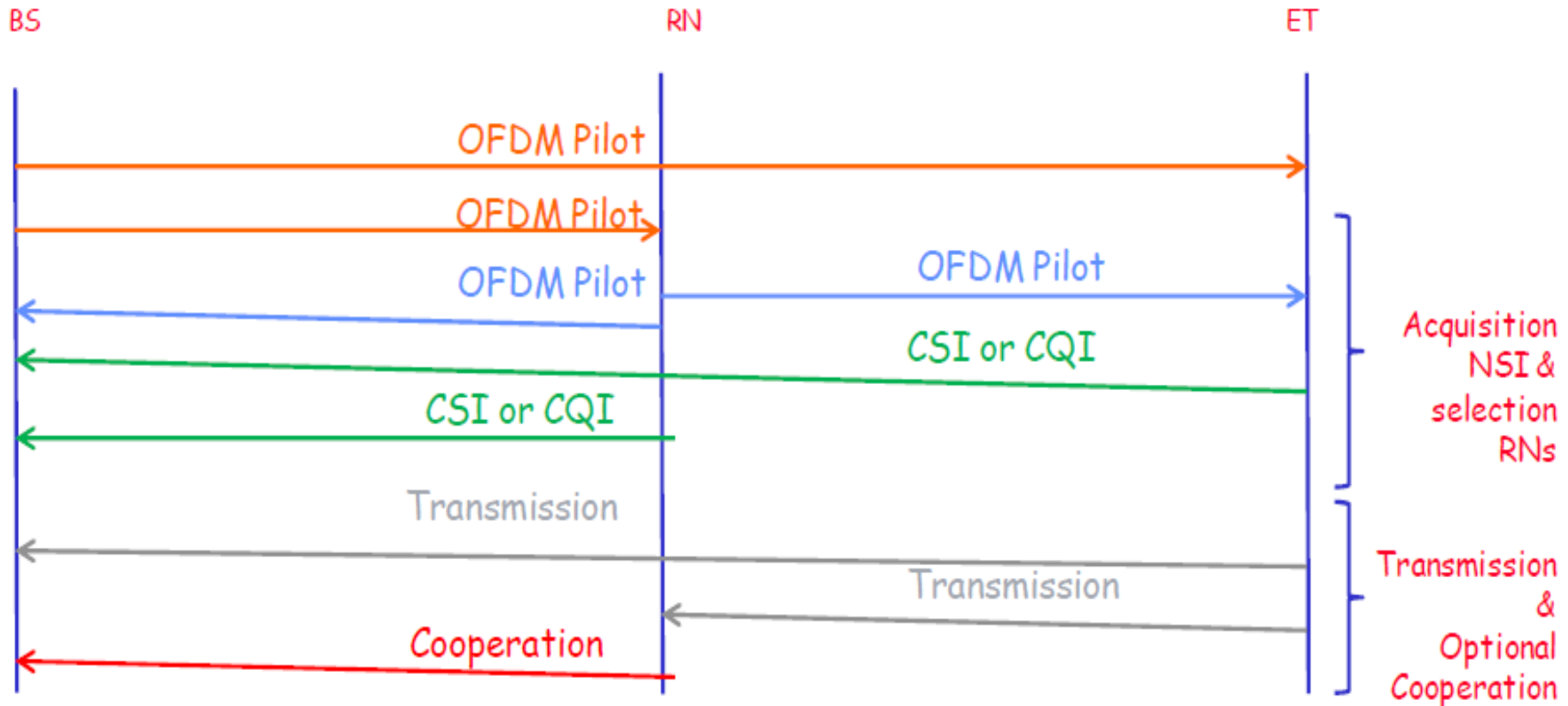


- Faza I : BS transmite semnale pilot către releu și destinație;
- Faza II: RN transmite semnale pilot către destinație;
- Faza III: RN și destinația raportează CSI - Channel State Information (sau CQI – Channel Quality Information) către BS pe canale specifice;
- Faza IV: BS analizează CSI recepționat și generează NSI – Network State Information;
- Faza V: Transmisie și cooperare;
- Trebuie definite canale specifice pentru transportul CSI / CQI, structura semnalelor pilot și structura cadrului;

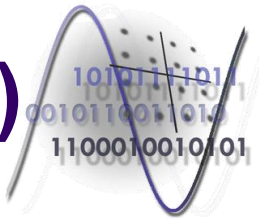
Aspecte legate de semnalizare



- Diagrama de semnalizare de principiu necesară pentru implementarea transmisiilor cooperative;

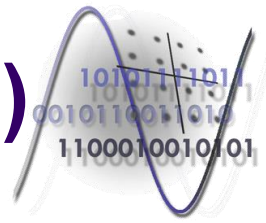


Tehnici multiantenă (MIMO)



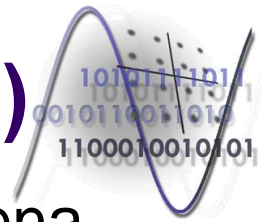
- Reprezintă una dintre metodele de exploatare a diversității spațiale;
- Ordinul de diversitate este un parametru definitoriu; stabilește performanțele de raport semnal-zgomot ale sistemului ce utilizează diversitatea;
 - $BER(SNR)=c \cdot SNR^{-d}$; c – constantă pozitivă; d – ordin de diversitate;
- În cazul unui sistem MIMO cu N transmițătoare și M receptoare, ordinul de diversitate maxim este $M \cdot N$ – reprezintă numărul gradelor de libertate ale sistemului;
- Sistem “full diversity” – sistem ce atinge ordinul de diversitate maxim;

Tehnici multiantenă (MIMO)

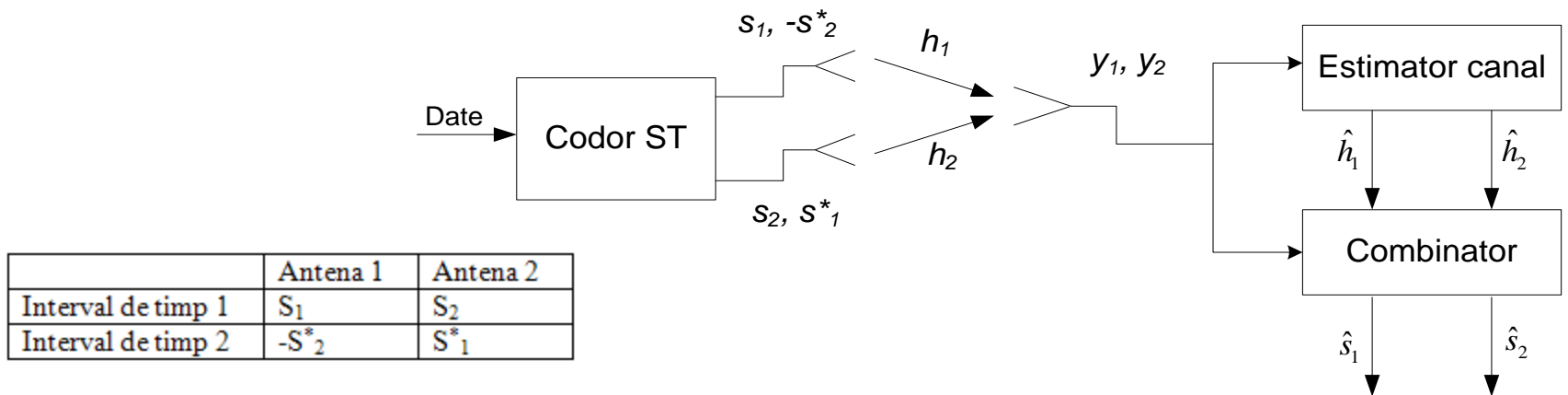


- Codurile Space-Time (ST) reprezintă una dintre metodele de bază pentru exploatarea diversității spațiale;
- Un cod ST este un set (colecție) de matrici: una din dimensiuni este spațiul, iar celălaltă dimensiune este timpul;
- Un cod ST atinge diversitatea maximă când se utilizează un receptor ML dacă matricea codului are ordin maxim sau dacă diferența oricăror două matrici este de ordin maxim;
 - Cel mai cunoscut cod ST este codul Alamouti;
 - Are diversitate maximă; receptorul ML este identic cu receptorul liniar;

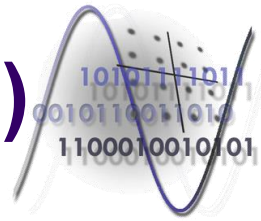
Tehnici multiantenă (MIMO)



- Exploatarea diversității spațiale în sistemele multiantena – codarea Alamouti;
- Se consideră un sistem MISO cu 2 antene la emisie și una la recepție – codare Space-Time;
 - Se consideră transmisia a două simboluri în două intervale de timp;
 - În primul interval de timp se transmite câte un simbol pe fiecare antena, iar în cel de-al doilea interval de timp sunt transmise simbolurile complex conjugate pe fiecare antenă;

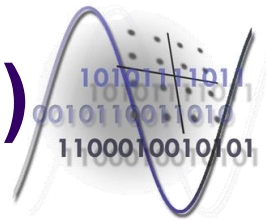


Tehnici multiantenă (MIMO)



- Dacă cele două intervale temporale sunt afectate identic de fading; semnalele recepționate în cele două intervale temporale se pot scrie:
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$
- Simbolurile recepționate în cele două intervale de timp sunt:
$$y_1 = h_1 \cdot s_1 + h_2 \cdot s_2 + z_1$$
$$y_2 = -h_1 \cdot s_2^* + h_2 \cdot s_1^* + z_2$$
- Simbolurile obținute la ieșirea combinatorului sunt:
$$\hat{s}_1 = \hat{h}_1^* \cdot y_1 + \hat{h}_2 \cdot y_2^*$$
$$\hat{s}_2 = \hat{h}_2^* \cdot y_1 - \hat{h}_1 \cdot y_2^*$$
- Dacă coeficienții canalului sunt estimați corect simbolurile estimate devin:

Tehnici multiantenă (MIMO)

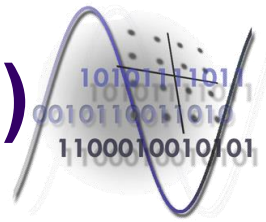


- expresia simbolurilor estimate în transmisia bazată pe coduri ST Alamouti;

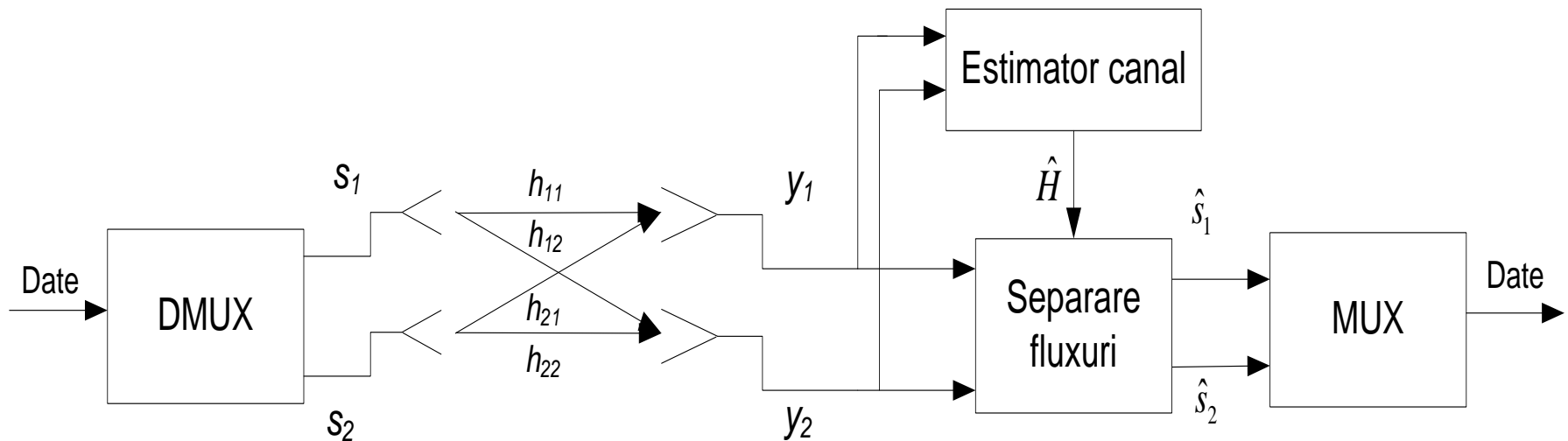
$$\begin{aligned}\hat{s}_1 &= h_1^* \cdot y_1 + h_2 \cdot y_2^* \\ &= h_1^* \cdot (h_1 \cdot s_1 + h_2 \cdot s_2 + z_1) + h_2 \cdot (-h_1^* \cdot s_2 + h_2^* \cdot s_1 + z_2^*) \\ &= h_1^* \cdot h_1 \cdot s_1 + h_1^* \cdot h_2 \cdot s_2 + h_1^* \cdot z_1 - h_2 \cdot h_1^* \cdot s_2 + h_2 \cdot h_2^* \cdot s_1 + h_2 \cdot z_2^* \\ &= (h_1^* \cdot h_1 + h_2 \cdot h_2^*) \cdot s_1 + h_1^* \cdot z_1 + h_2 \cdot z_2^* \\ &= (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot s_1 + h_1^* \cdot z_1 + h_2 \cdot z_2^*\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{s}_2 &= h_2^* \cdot y_1 - h_1 \cdot y_2^* \\ &= h_2^* \cdot (h_1 \cdot s_1 + h_2 \cdot s_2 + z_1) - h_1 \cdot (-h_1^* \cdot s_2 + h_2^* \cdot s_1 + z_2^*) \\ &= h_2^* \cdot h_1 \cdot s_1 + h_2^* \cdot h_2 \cdot s_2 + h_2^* \cdot z_1 + h_1 \cdot h_1^* \cdot s_2 - h_1 \cdot h_2^* \cdot s_1 - h_1 \cdot z_2^* \\ &= (h_1^* \cdot h_1 + h_2 \cdot h_2^*) \cdot s_2 + h_2^* \cdot z_1 - h_1 \cdot z_2^* \\ &= (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot s_2 + h_2^* \cdot z_1 - h_1 \cdot z_2^*\end{aligned}$$

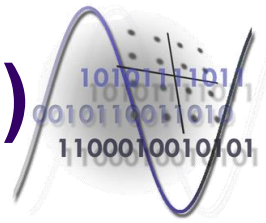
Tehnici multiantenă (MIMO)



- Exploatarea multiplexării spațiale in sistemele MIMO;
 - În acest caz pe fiecare antenă de emisie sunt transmise fluxuri diferite. Numărul maxim de fluxuri care pot fi transmise este dat de numărul minim de antene al emițătorului sau al receptorului.
 - Nr. Max. Flux = $\min(\text{Nr. Antene emisie}, \text{Nr. Antene receptie})$;



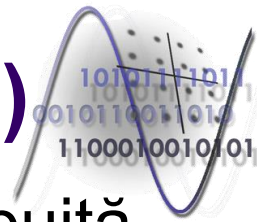
Tehnici multiantenă (MIMO)



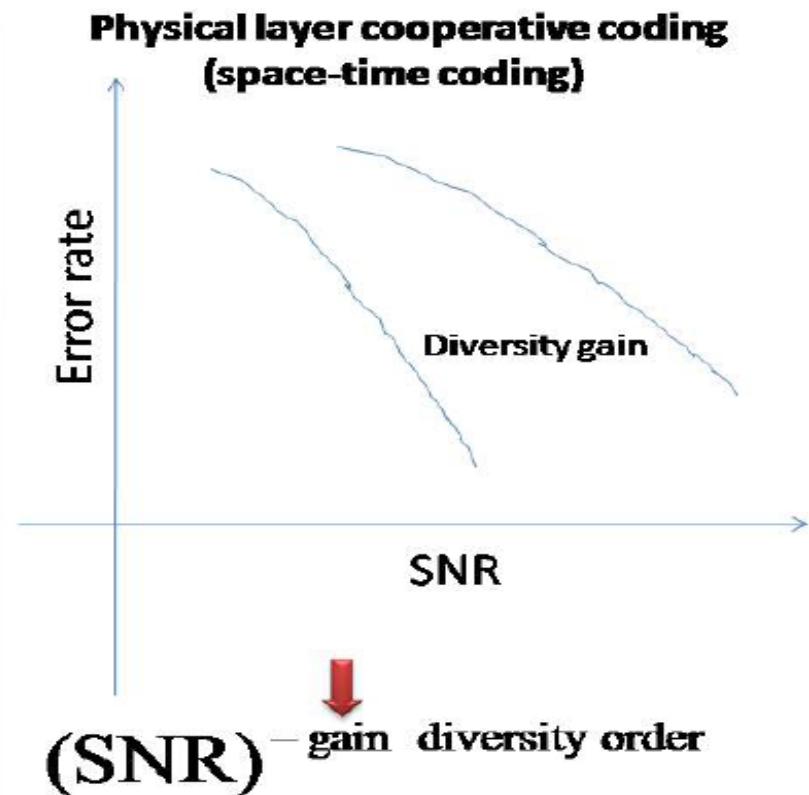
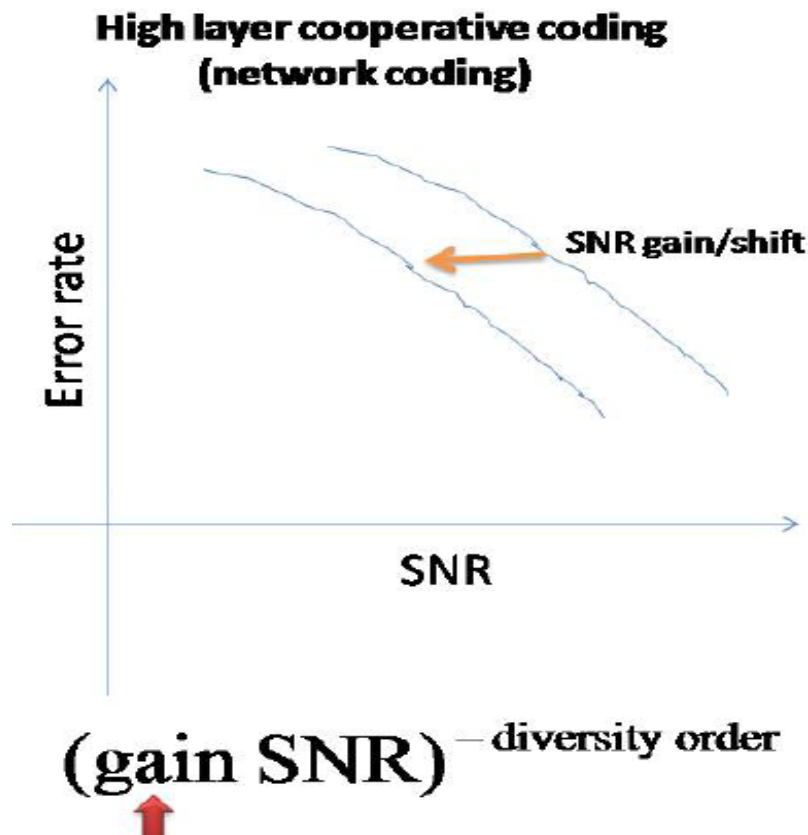
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow Y = H \cdot S + Z$$

- Separarea fluxurilor se poate face prin înmulțirea semnalelor recepționate pe cele două antene cu inversul matricii de canal: $\hat{S} = \hat{H}^{-1} \cdot Y$
- Majoritatea codurilor ST ating diversitate maximă când se utilizează receptoare ML;
- Una dintre provocările cele mai importante legate de construcția codurilor ST este utilizarea unui raport corespunzător între diversitate – multiplexare – complexitate:
 - Cum se pot construi coduri ST care ating diversitate maximă când este utilizat un receptor de complexitate mică?

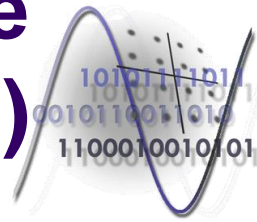
Tehnici multiantenă (MIMO)



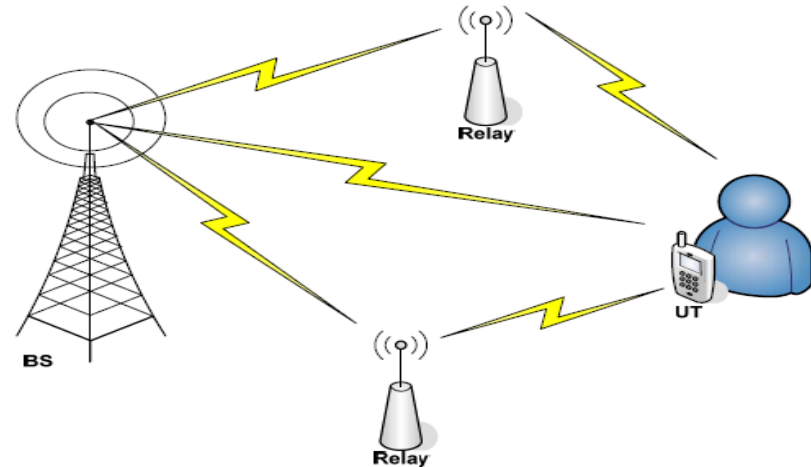
- Scurtă comparație între tehnicile de codare distribuită (Network Coding) și tehnicile de codare Space-Time;
 - Câștig de codare versus câștig de diversitate



Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)

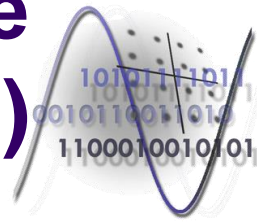


- Tehnici de codare distribuită Space-Time;
 - Asigură canale decorelate – se poate obține diversitatea maximă;



- Implementarea tehnicilor de codare ST distribuite:
 - Rețea de relee asincrone: antene de transmisie nu sunt colocalizate și implicit sunt asincrone – nu se poate obține diversitatea maximă; releele au offset de frecvență diferit;
 - Rețea de relee sincronizate: se pot aplica direct toate tehnicile existente de codare ST; se obține diversitate maximă;

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Scenariu Alamouti distribuit:
 - Se utilizează două relee cu o singură antenă care implementează sistemul de antene; BS și UT au o singură antenă – vezi fig. slide anterior – nu se consideră legătura directă; BS, releele și UT trebuie să fie “perfect sincronizate;”
 - Se poate utiliza un protocol în două faze:
 - Faza 1: Stația de bază trimite (broadcast) un pachet de date (simboluri) către cele două relee; legătura directă s-ar putea utiliza, dar nu în acest scenariu;
 - Cadru BS:

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------
 - Faza 2: Releele implementează codarea Alamouti prin procesarea și trimiterea în ordine corespunzătoare a simbolurilor recepționate;
 - Cadru releu 1:

S_1	$-S_2^*$	S_3	$-S_4^*$	S_5	$-S_6^*$
-------	----------	-------	----------	-------	----------
 - Cadru releu 2:

S_2	S_1^*	S_4	S_3^*	S_6	S_5^*
-------	---------	-------	---------	-------	---------

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



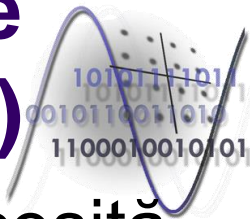
- Performanțele codării Alamouti distribuite sunt similare cu cele ale codării Alamouti clasice, dacă canalul BS – RN se poate considera “error free”;
 - Dacă această condiție nu este îndeplinită apare o scădere a performanțelor și a diversității obținute – vezi cazul SFBC (ultimele slide-uri) pentru o comparație a performanțelor cooperării bazate pe DF;
- Un dezavantaj al codării ST prezentate este aceea că sunt necesare două rele;
 - Este posibilă definirea unei metode de codare Alamouti distribuită bazată numai pe un singur releu și pe utilizarea legăturii directe – vezi fig. anterioară în care se utilizează numai un releu și legătura directă:
 - Faza 1: Stația de bază trimite (broadcast) un pachet de date numai către releu; cadru BS:

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------
 - Faza 2: BS și releul implementează codarea Alamouti:
 - Cadru BS :

S_1	$-S_2^*$	S_3	$-S_4^*$	S_5	$-S_6^*$
-------	----------	-------	----------	-------	----------
 - Cadru releu:

S_2	S_1^*	S_4	S_3^*	S_6	S_5^*
-------	---------	-------	---------	-------	---------

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)

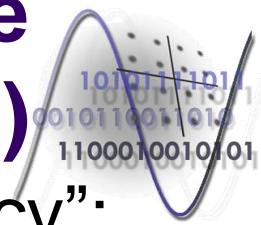


- Implementarea tehnicilor MIMO distribuite necesită sincronizarea BS, UT și a releelor;
 - Problema sincronizării se referă atât la frecvență cât și la timp;
 - Ambele sincronizări se pot realiza pe baza unor semnale de referință generate de BS;
 - Problema sincronizării în timp poate fi mai complexă datorită întârzierilor dintre elementele care cooperează;
 - Un exemplu simplu legat de cazul codului Alamouti distribuit: releele care implementează sistemul de antene sunt desincronizate în timp – apare o alunecare a semnalelor transmise;

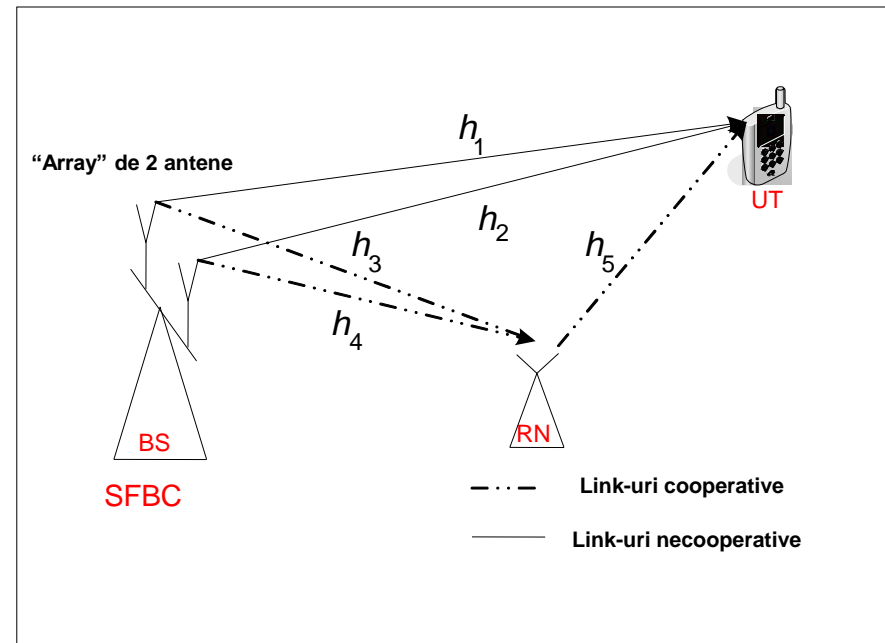
- De exemplu releul unu (cel de sus) rămâne în urmă:

$$\begin{bmatrix} y_1 & -y_2^* & x_1 & -x_2^* & z_1 & -z_2^* \\ y_2 & y_1^* & x_2 & x_1^* & z_2 & z_1^* \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -y_2^* & x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* & z_2 \end{bmatrix}$$

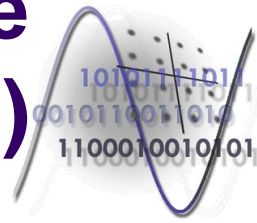
Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Tehnici de codare distribuită “Space-Frequency”:
- Scenariu:
 - În figură este prezentat un scenariu de cooperare bazat pe MIMO distribuit implementat pe următoarea topologie: BS echipat cu un “array” de două antene, terminal utilizator echipat cu o singură antenă, nod releu echipat cu o singură antenă;
 - Schema de diversitate utilizată este de tip SFBC (“Space Frequency Block Code”);
 - Se pot identifica trei tipuri de legături:
 - Legături BS-UT: h_1 și h_2 ;
 - Legături BS-RN: h_3 și h_4 ;
 - Legături RN-UT: h_5 ;

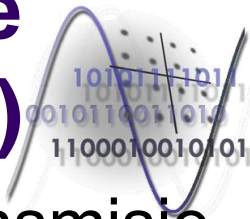


Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Transmisia cooperativă are loc în două faze:
 - În prima fază BS trimite datele la releu și la terminal;
 - Releul nu transmite date pe durata acestei faze;
 - În a doua fază releul transmite semnalele recepționate și procesate către terminalul utilizator;
 - Stația de bază nu transmite date în acest interval;
 - Se consideră trei tipuri de protocoale de cooperare (protocoale de bază):
 - “Amplify&Forward” (AF) - datele sunt doar retransmise după o scalare a puterii de transmisie; decodarea are loc numai la UT;
 - “Decode&Forward” (DF) – datele sunt decodate și transmise către stația utilizator după recodare;
 - “Selective Decode&Forward” (SDF) – releul reencodează datele numai dacă le poate decoda corect – este un protocol adaptiv;

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Schema de mapare SFBC cu două antene de transmisie și rată de codare 1 este prezentată în tabelul următor:

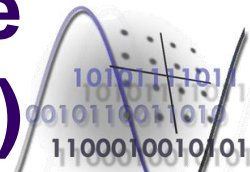
	Antena 1	Antena 2
Sub-purtătoare n	S_n	$-S_{n+1}^*$
Sub-purtătoare $n+1$	S_{n+1}	S_n^*

- Protocolul “Amplify-and-Forward”:
 - Semnalele recepționate de terminal pe durata primei faze a cooperării:

$$y_n(k + T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_n h_{1,n} - s_{n+1}^* h_{2,n}) + n_n(k + T_s)$$

$$y_{n+1}(k + T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{n+1} h_{1,n+1} + s_n^* h_{2,n+1}) + n_{n+1}(k + T_s)$$
 - unde $h_{m,n}$ reprezintă canalul afectat de fading pe sub-purtătoarea n și antena m , iar n_n reprezintă zgomotul pe sub-purtătoarea n ;
 - deviația standard a zgomotului este considerată constantă în frecvență - σ_{k1} ;

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Semnalele recepționate de releu în prima fază a cooperării pe sub-purtătoarele n și $n+1$ sunt date de:

$$z_n(k + T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_n h_{3,n} - s_{n+1}^* h_{4,n}) + n_n^R(k + T_s)$$

$$z_{n+1}(k + T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{n+1} h_{3,n+1} + s_n^* h_{4,n+1}) + n_{n+1}^R(k + T_s)$$

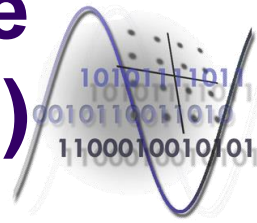
- unde $h_{m,n}$ are aceeași semnificație ca și în relația anterioară; n_n^R reprezintă zgomotul pe legăturile BS – RN;
 - deviația standard a zgomotului este considerată constantă în frecvență - σ_{k2} ;
- Semnalele decodate la terminalul utilizator după etapa a doua de cooperare sunt date de:

- zgomotul are deviația standard: - σ_{k3} ;

$$y_n(k + 2T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha h_{5,n} (s_n h_{3,n} - s_{n+1}^* h_{4,n}) + \alpha h_{5,n} n_n^R(k + T_s) + n_n(k + 2T_s)$$

$$y_{n+1}(k + 2T_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha h_{5,n+1} (s_{n+1} h_{3,n+1} + s_n^* h_{4,n+1}) + \alpha h_{5,n+1} n_{n+1}^R(k + T_s) + n_{n+1}(k + 2T_s)$$

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)

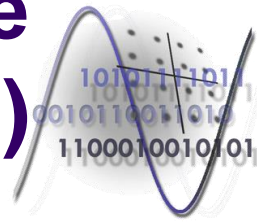


- Constanta α este un factor de scalare legat de constrângerile de putere impuse releului; este echivalent cu factorul β (vezi discuția legată de performanțele protocolului AF);

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{2} E \left\{ |h_{3,n}|^2 \right\} + \frac{1}{2} E \left\{ |h_{4,n}|^2 \right\} + \sigma_{k2}^2}}$$

- Se introduc notațiile: $h_{eq1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha h_{3,n} h_{5,n}$ $h_{eq2,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha h_{4,n} h_{5,n}$
 - și se obține: $y_n(k + 2T_s) = (s_n h_{eq1,n} - s_{n+1}^* h_{eq2,n}) + \alpha h_{5,n} n_n^R(k + T_s) + n_n(k + 2T_s)$
 $y_{n+1}(k + 2T_s) = (s_{n+1} h_{eq1,n+1} + s_n^* h_{eq2,n+1}) + \alpha h_{5,n+1} n_{n+1}^R(k + T_s) + n_{n+1}(k + 2T_s)$
- La terminal se realizează o combinare spațiu-frecvență după ambele faze ale procesului de cooperare;

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Semnalul de pe perechi adiacente de subpurtătoare n și $n+1$ la momentele $i=k+T_s$, $k+2T_s$ după combinarea spațiu-frecvență și utilizarea coeficienților de egalizare definiți mai jos este:

$$\hat{s}_n(i) = g_{1,n,i} y_n(i) + g_{2,n,i}^* y_{n+1}^*(i)$$

$$\hat{s}_{n+1}(i) = -g_{2,n,i}^* y_n^*(i) + g_{1,n,i} y_{n+1}(i)$$

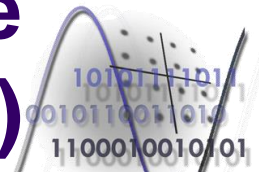
- Coeficienții de egalizare sunt definiți în felul următor:

$$g_{1,n,i} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h_{1,n}^*}{\sigma_{k1}^2} & , i = k + T_s \\ \frac{h_{eq1,n}^*}{\sigma_{k,t}^2} & , i = k + 2T_s \end{cases} \quad g_{2,n,i}^* = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h_{2,n}}{\sigma_{k1}^2} & , i = k + T_s \\ \frac{h_{eq2,n}}{\sigma_{k,t}^2} & , i = k + 2T_s \end{cases}$$

- unde $\sigma_{k,t}^2$ reprezintă puterea totală a zgomotul recepționat pe sub-purtătoarea n la momentul $i=k+2T_s$ și se poate scrie ca:

$$\sigma_{k,t}^2 = \alpha^2 |h_{5,n}|^2 \sigma_{k2}^2 + \sigma_{k3}^2$$

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



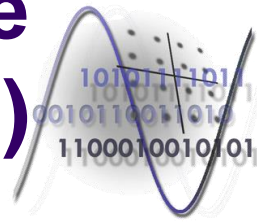
- Deoarece puterea totală a zgomotului depinde de factorul $|h_{5,n}|^2$, acest factor trebuie calculat pentru toate sub-purtătoarele;
- Sistemele OFDM utilizează uzual o separație a subpurtătoarelor mult mai mică decât banda de coerență a canalului – fadingul de pe două sub-purtătoare alăturate este plat și identic: $h_n = h_{n+1}$;
 - În consecință se poate considera că $g_{1,n,i} = g_{1,n+1,i}$
- Semnalele decodate la momentele $i=k+T_s$, $k+2T_s$ se adună și semnalul decodat pe sub-purtătoarea n este:

$$\hat{s}_n = \left(\frac{1}{2} \frac{|h_{1,n}|^2}{\sigma_{k1}^2} + \frac{1}{2} \frac{|h_{2,n}|^2}{\sigma_{k1}^2} + \frac{|h_{eq1,n}|^2}{\sigma_{k,t}^2} + \frac{|h_{eq2,n}|^2}{\sigma_{k,t}^2} \right) s_n$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h_{1,n}^*}{\sigma_{k1}^2} n_n(k+T_s) + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h_{2,n}}{\sigma_{k1}^2} n_{n+1}^*(k+T_s) + \frac{h_{eq1,n}^*}{\sigma_{k,t}^2} n_n(k+2T_s) + \frac{h_{eq2,n}^*}{\sigma_{k,t}^2} n_{n+1}^*(k+2T_s)$$

$$+ \frac{h_{eq1,n}^*}{\sigma_{k,t}^2} \alpha h_{5,n} n_{R,n}(k+T_s) + \frac{h_{eq2,n}}{\sigma_{k,t}^2} \alpha h_{5,n}^* n_{R,n+1}^*(k+T_s)$$

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Protocolul “Decode-and-Forward”:

- Semnalul recepționat pe sub-purtătoarele adiacente n și $n+1$ se poate scrie ca:

$$y_n(k + 2T_s) = \bar{s}_n h_{5,n} + n_n(k + 2T_s)$$

$$y_{n+1}(k + 2T_s) = \bar{s}_{n+1} h_{5,n+1} + n_{n+1}(k + 2T_s)$$

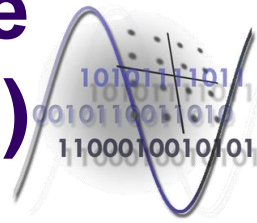
- unde \bar{s}_n reprezintă semnalul decodat de către releu;
- Dacă la terminal se utilizează o combinație MRC pe fiecare sub-purtătoare se obține:
 - Semnalul de pe calea directă se decodează cu SFBC și se combină MRC cu semnalul de la releu

$$\hat{s}_n = \frac{1}{2} \left(|h_{1,n}|^2 + |h_{2,n}|^2 \right) s_n + |h_{5,n}|^2 \bar{s}_n$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{2}} h_{1,n}^* n_n(k + T_s) + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{2,n} n_{n+1}^*(k + T_s) + h_{5,n}^* n_n(k + 2T_s)$$

- Dacă semnalul decodat de releu \bar{s}_n este egal cu semnalul original s_n atunci semnalul obținut pe sub-purtătoarea n este:

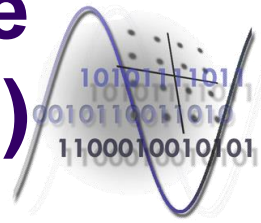
Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



$$\hat{s}_n = \left(\frac{1}{2} \left(|h_{1,n}|^2 + |h_{2,n}|^2 \right) + |h_{5,n}|^2 \right) s_n \\ + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{1,n}^* n_n(k + T_s) + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{2,n} n_{n+1}^*(k + T_s) + h_{5,n}^* n_n(k + 2T_s)$$

- Protocolul “Selective Decode-and-Forward”:
 - Este demonstrat teoretic că transmisia cooperativă DF nu asigură câștig de diversitate nici la valori mari de SNR, datorită faptului că releul trebuie să decodeze semnalul;
 - Schema “Selective DF” se poate utiliza pentru eliminarea acestei probleme:
 - Releul decodează semnalul recepționat și îl retransmite numai dacă a fost decodat corect; dacă decodarea la releu nu reușește terminalul utilizează numai transmisia directă;
 - La terminalul utilizator se poate realiza o combinație MRC folosind semnalele de la BS și de la releu;

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



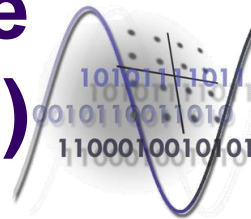
$$\hat{s}_n = \left(\frac{1}{2} |h_{1,n}|^2 + \frac{1}{2} |h_{2,n}|^2 + |h_{5,n}|^2 \right) s_n + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{1,n}^* n_n (k + T_s) + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{2,n} n_{n+1} (k + T_s) + h_{5,n}^* n_n (k + 2T_s)$$

- Dacă releul nu poate decoda datele atunci nu poate participa la cooperare și semnalul decodat pe baza transmisiei directe este:

$$\hat{s}_n = \left(\frac{1}{2} |h_{1,n}|^2 + \frac{1}{2} |h_{2,n}|^2 \right) s_n + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{1,n}^* n_n (k + T_s) + \frac{1}{\sqrt{2}} h_{2,n} n_{n+1} (k + T_s)$$

- Este de fapt relația corespunzătoare unei scheme 2x1 SFBC;

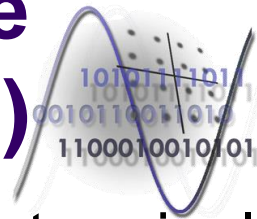
Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Performanțele schemei SFBC:
 - Evaluarea performanțelor s-a realizat în condițiile unor modele de canale wireless folosite uzual; s-a considerat o viteză redusă a mobilului (3km/h) – fading lent variabil;
 - S-a realizat o comparație din p.d.v. al performanțelor cu sistemele: SISO, MISO (2x1) și MIMO (2x2) ce utilizează același model de canal;
 - Schemele de modulare-codare utilizate:

Mode	Constellation	Code rate	CTC code size (N, K)
1	QPSK	1/2	(7200, 3600)
2	BPSK	1/2	(3600, 1800)

Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



- Se presupune perfect CSI atât la releu (RN) cât și la terminal (UT) și că puterea totală transmisă este limitată la 1;
 - Rezultatele sunt date ca și funcție de E_b/N_o , unde E_b este energia pe bit și $N_o/2$ este densitatea spectrală de putere la UT;
- Raportul semnal-zgomot la utilizatori se definește ca și:

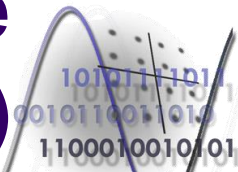
$$SNR_i = \frac{P_t}{\sigma_{ni}^2}$$

- unde P_t este puterea totală transmisă și σ_{ni}^2 este puterea zgomotului la receptorul i .
- Rapoartele semnal-zgomot considerate pe cele trei căi ale sistemului cooperativ sunt următoarele:

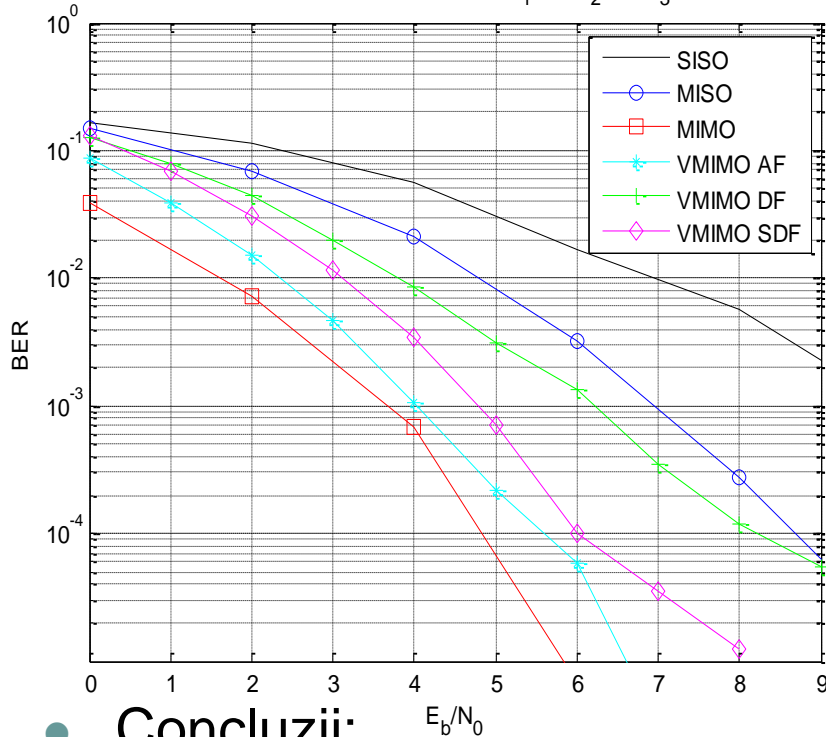
- Se consideră următoarele două cazuri:
 - $SNR_1=SNR_2=SNR_3$;
 - $SNR_1=SNR_3$; $SNR_2=SNR_1+10\text{dB}$;

Link	SNR
BS-UT	SNR_1
BS-RN	SNR_2
RN-UT	SNR_3

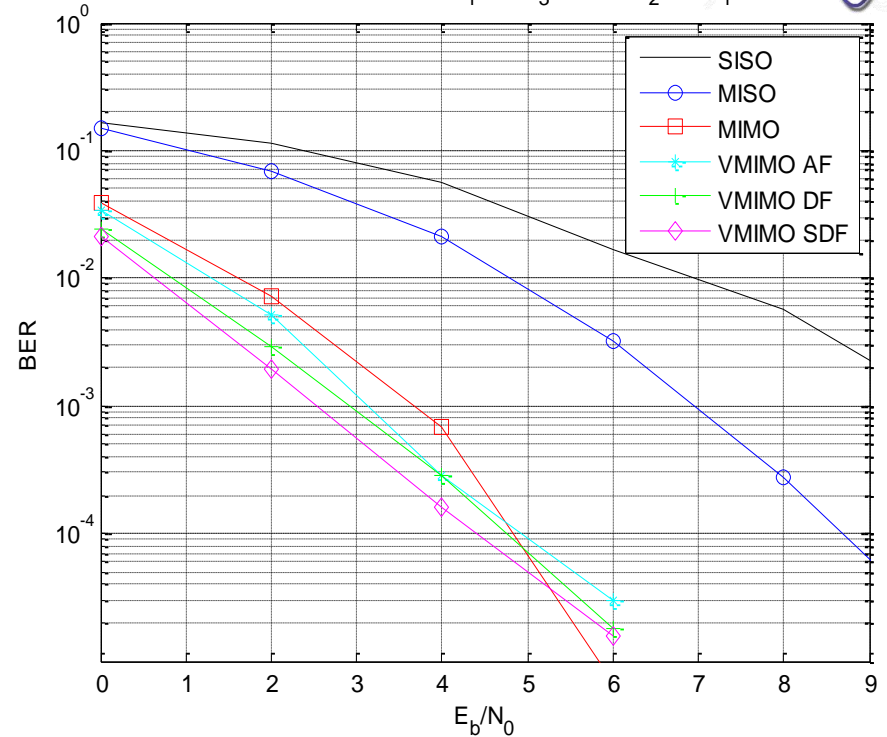
Tehnici multiantenă distribuite (MIMO-distribuit)



Virtual MIMO BER, with $SNR_1=SNR_2=SNR_3$



Virtual MIMO BER, with $SNR_1=SNR_3$ and $SNR_2=SNR_1+10dB$



Concluzii:

- Performanțele MIMO 2x2 sunt cele mai bune în condițiile considerate – s-a luat în considerare și corelația dintre antene – poate crește în situații reale;
 - Scopul principal al studiului este ilustrarea efectului pe care îl are canalul sursă-releu asupra performanțelor sistemului ce implementează MIMO distribuit;
- Complexitatea MIMO 2x2 este asemănătoare cu cea VMIMO-DF (SDF);