

---

# **ANTENSKI NIZOVI U TELEKOMUNIKACIONIM SYSTEMIMA**

**(13M031ANT)**

## **Uvod u teoriju antenskih nizova – Primena u TK sistemima: MIMO sistemi**

**Elektrotehnički fakultet – Univerzitet u Beogradu  
Odsek za telekomunikacije i informacione tehnologije**

**Katedra za telekomunikacije**

**prof. Goran Marković**

**2024/2025**



# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- ❖ Jedan od najvećih, i možda ključni, problem za dalji razvoj savremenih bežičnih TK sistema je sve veći zahtevani kapacitet sistema u uslovima ograničene količine spektra (**ne samo administrativno i tehnološki**).
- ❖ Sistemi sa naprednim (*advanced*) antenskim sistemom, tzv. MA sistemi (*Multi-Antenna Systems, MAS*), kod kojih se antenski sistem sastoji od većeg broja antenskih elemenata – odnosno sistemi u kojima se predaja i prijem odvija korišćenjem većeg broja elementarnih antena – **predstavlja jedno od mogućih rešenja za navedeni problem povećanja kapaciteta bežičnih TK sistema u uslovima ograničenog opsega učestanosti (RF opega)**.
- ❖ Postoji više različitih generičkih struktura pri analizi MAS sistema:

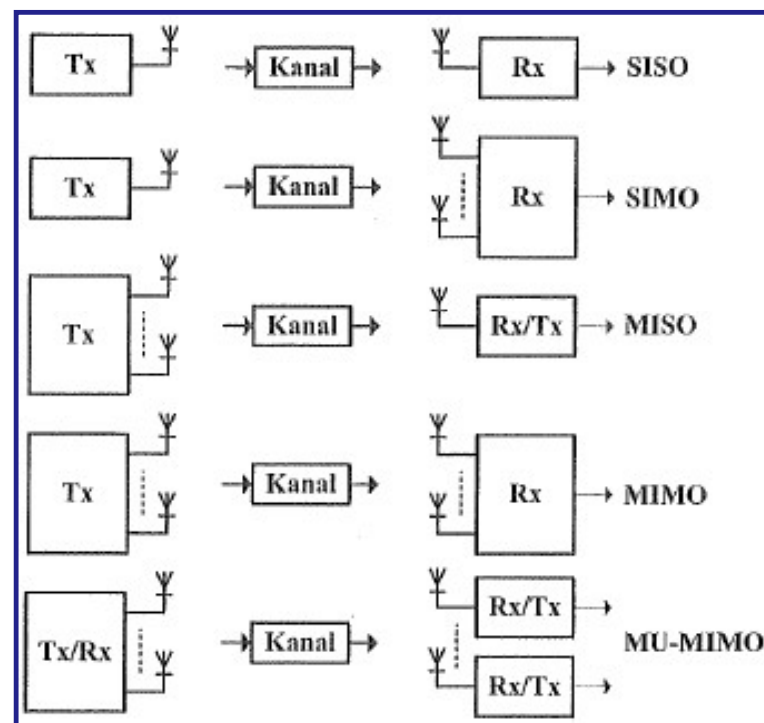
- Konvencionalan sistem sa stanovišta primene MAS sistema - Jedna predajna i jedna prijemna antena (*SISO, Single Input Single Output*). Kapacitet ovih sistema je određen *Shannon*-ovim izrazom:

$$C_{SISO} = B_{ch} \times \log(1 + E_S / N_0)$$

gde su  $B_{ch}$ ,  $E_S$  i  $N_0$  širina propusnog opsega kanala, srednja energija po simbolu prenošenog signala i SGSS ABGŠ na ulazu u prijemnik – analiza prenosa signala se odvija u vremensko-frekvencijskom domenu.

# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- Jedna predajna i više prijemnih antena (SIMO, *Single Input Multiple Output*).
  - Više predajnih i jedna prijemna antena (MISO, *Multiple Input Single Output*).
  - Više predajnih i više prijemnih antena (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*).
- ❖ Osnovna prednost sistema sa više Tx (predajnih) i/ili Rx (prijemnih) antena je mogućnost korišćenja prostornog domena propagacije radio signala u procesu obrade signala na predaji i/ili prijemu.
  - ❖ U SISO sistemima obrada signala odvija se samo u 2D domenu (vreme-učestanost) – u MIMO koristimo 3D sa prostorom kao dodatnom dimenzijom za obradu signala. U sistem se ugrađuje prostorni diversiti kao inherentna osobina.
  - ❖ MIMO tehnologija je sada deo raznih standarda – LTE, IEEE 802.11n WLAN ...



Ovde su dati osnovni principi a razrada u predmetima iz oblasti bežičnih komunikacija (Radio tehnologije, Javni mobilni sistemi, Bežične mreže, ...)

# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- ❖ Osnovni dobici koji se ostvaruju pri primeni MIMO sistema su:
  - Primenu usmerenih prostornih odziva (antenskih dijagrama) Tx/Rx antenskih sistema. Na ovaj način ostvaruje se dobitak antenskog niza – ogleda se u koherentnom kombinovanju signala sa izlaza pojedinih antenskih elemenata;
  - Primenu prostornog diversitija usled razdvajanja Tx/Rx antena u prostoru. Povećava se verovatnoća da bar jedan od linkova (između svake predajne i svake prijemne) antene nije pod uticajem fedinga. Za  $N_T$  predajnih i  $N_R$  prijemnih antena imamo  $N_T \times N_R$  *diversiti linkova*. Maksimalni teorijski dobitak prostornog diversitija je:

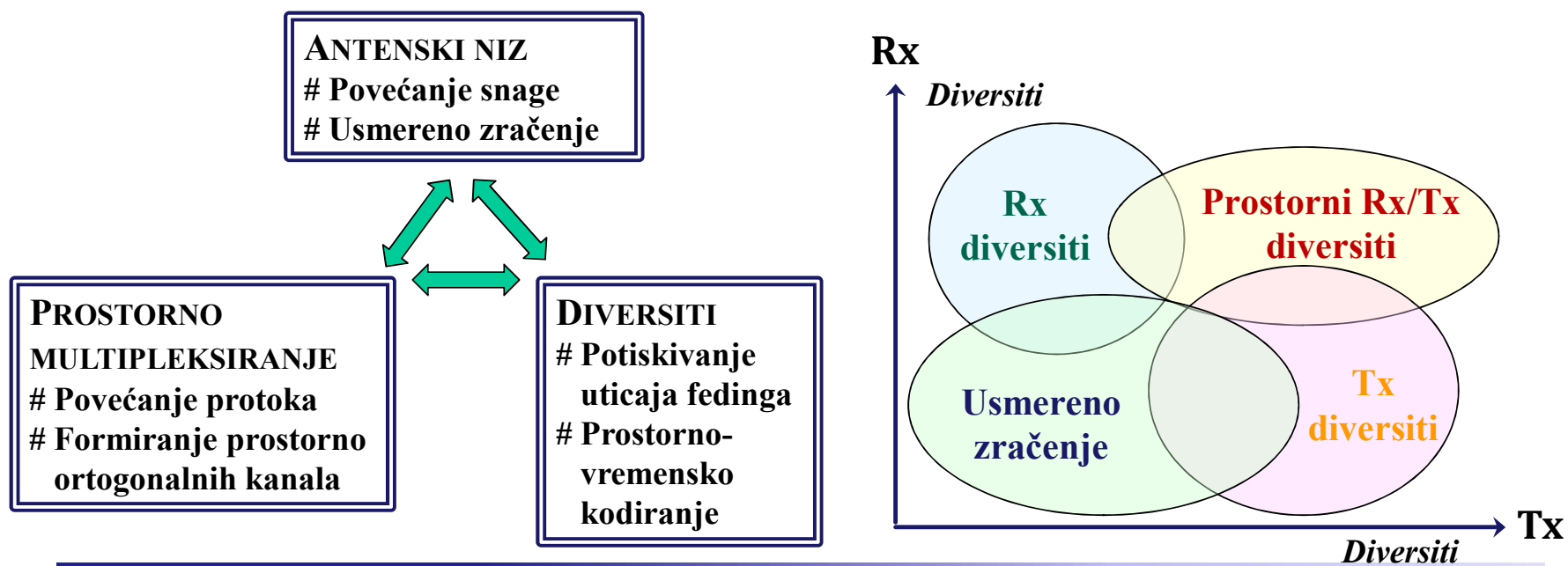
$$G_{sdiv} = \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \left[ \frac{\log(P_e)}{\log(\gamma)} \right]$$

gde je  $P_e$  verovatnoća greške a  $\gamma$  odnos S/N.

- Efikasnog smanjivanja uticaja svih oblika fedinga pri propagaciji radio signala združenom primenom različitih formi diversitija (prostorni, vremenski, kodni, frekvencijski pri primeni OFDM i drugih tehnika).

# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- ❖ Zavisno od forme realizacije MIMO sistema pravi se rešenje u kome se kombinuju osnovni mehanizmi za ostvarivanje povećanja kapaciteta:
  - Antenski niz (povećanje snage, usmereno zračenje)
  - Prostorno multipleksiranje (povećanje protoka, formiranje prostorno ortogonalnih kanala)
  - Diversiti (potiskivanje uticaja fedinga, prostorno-vremensko kodiranje).



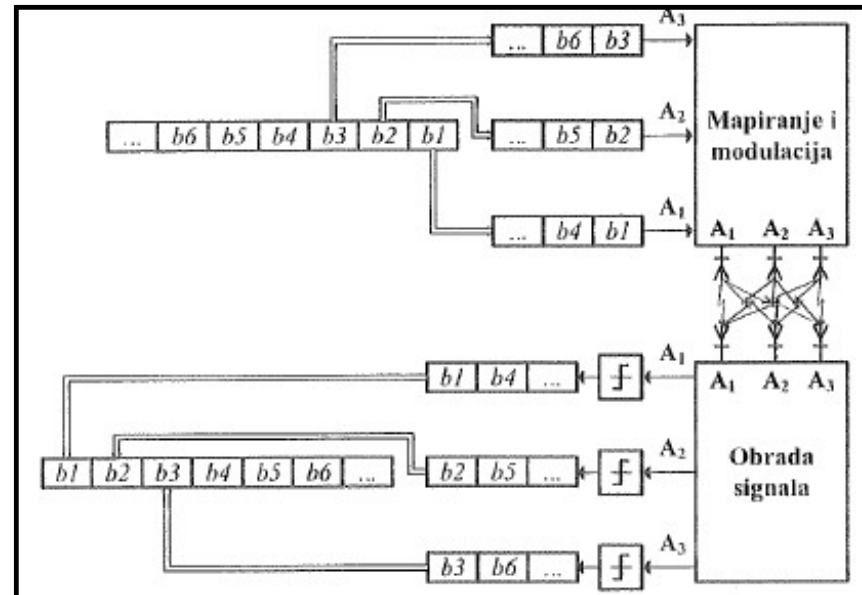
# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- Dobitak prostornog multipleksiranja (multipleksiranja u prostornom domenu). Imamo mogućnost paralelnog istovremenog prenosa nezavisnih signala u istom opsegu učestanosti. Na taj način možemo ostvariti višestruko povećanje kapaciteta sistema. Princip prostornog multipleksiranja zasniva se na serijsko-paralelnoj konverziji simbola informacione sekvence i nezavisan (ortogonalan prenos po prostornim podkanalima-kanalima).

$$G_{smux} = -\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \left[ \frac{V_S(\gamma)}{\log(\gamma)} \right]$$

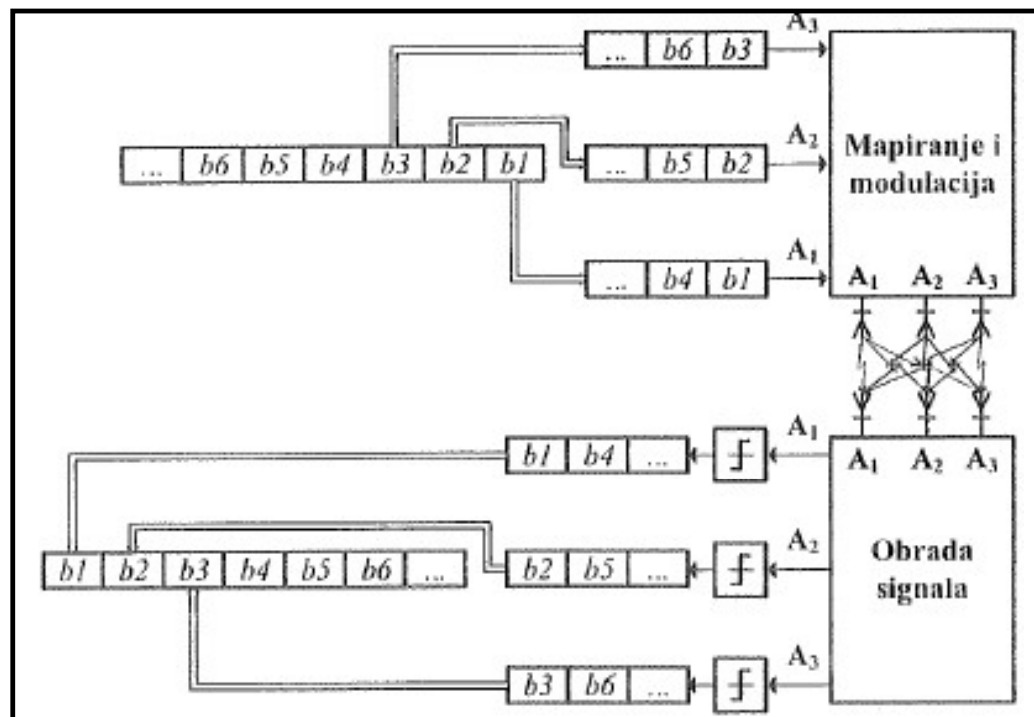
Teorijski izraz  
 $V_S$  je brzina  
signaliziranja

$$G_{smux} = \min(N_T, N_R)$$



# MIMO sistemi – Motivacija i principi

- Na primeru sa slike svaki treći informacioni simbol se dovodi na određenu Tx antenu i prenosi simultano sa drugim simbolima.
- Ako su kanali prenosa nekorelisani, i ako prijemnik poznaje stanje kanala (CSI, *Channel State Information*) u prijemniku se obavlja ekstrakcija i paralelno-serijska konverzija u originalnu informacionu sekvencu.
- Prvi prostorni multipleks BLAST.



Za slučaj kada imamo  $N_T$  predajnih i  $N_R$  prijemnih antena -  $N_T \times N_R$  dobitak prostornog multipleksiranja:

$$G_{smux} = \min(N_T, N_R)$$

# MIMO sistemi – Motivacija i principi

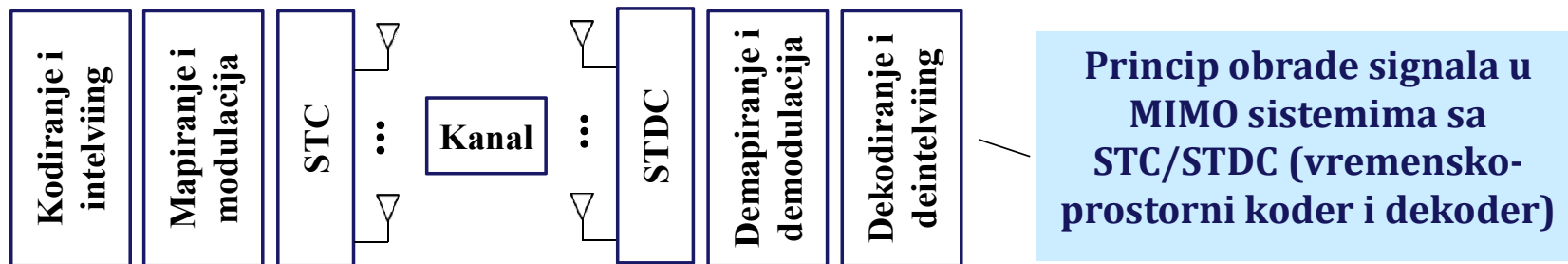
- U MIMO sistemima moguće je istovremeno ostvariti i dobitak prostornog diversitija i dobitak prostornog multipleksiranja (neko srednje rešenje – ne mogu maksimalni dobiti da se ostvare za obe obrade).

**Primer – Ako je dobitak prostornog multipleksiranja u kanalu sa fadingom optimalan – dobitak prostornog diversitija iznosi :**

$$G_{sdiv} = (N_T - G_{smux}) \times (N_R - G_{smux}), G_{smux} = 0, 1, K, \min(N_T, N_R)$$

**Maksimalna vrednost se dobija kada je  $G_{smux} = 0$  tj. imamo da je  $G_{sdiv} = N_T \times N_R$ .**

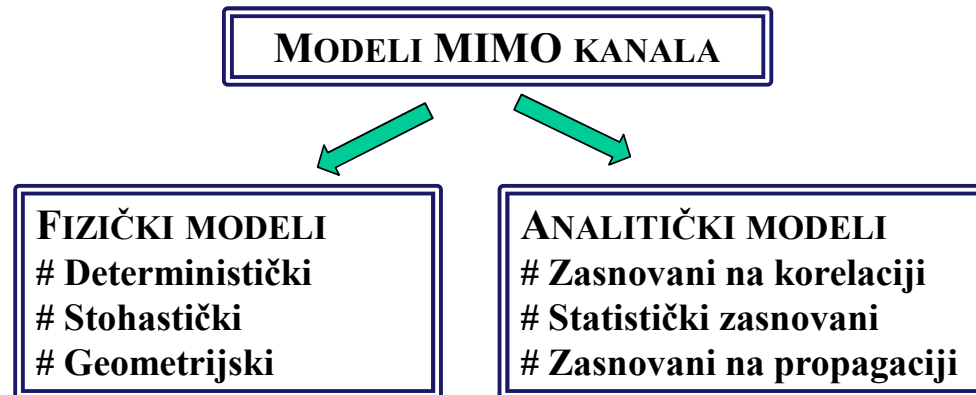
- Potiskivanje interferencije koja je posledica višekorisničkog okruženja. U MIMO sistemima se ovaj tip interferencije potiskuje veoma uspešno i efikasno usled prostornog multipleksiranja i prostornog diversitija.
- Mogućnost primene principa prostorno-vremenskog kodiranja (STC, *Space-Time Coding*) – informaciona sekvenca se prostorno-vremenski kodira tako da se dobije niz sekvenci simbola koji se prenosi preko svake pojedinačne antene.





# MIMO sistemi – Kanal

- ❖ Radio prenos u MIMO sistema karakteriše se specifičnim osobinama kanala. Na osnovu rezultata merenja propagacije - predloženo više modela kanala.
- ❖ Fizički modeli:
  - Deterministički modeli – definišu kanal kroz postupak predikcije propagacije signala. Baza podataka o morfološkim osobinama propagacione sredine.
  - Stohastički modeli – opisuje model kanala preko funkcija gustine verovatnoće parametara kanala. Obimna merenja karakteristika kanala za različite sredine propagacije - pogodni za predikciju putem računarskih simulacija.
  - Geometrijski – Stohastički zasnovani modeli koji kombinuju prethodna dva pristupa pri čemu se geometrijskim prikazom sredine propagacije dodaju statističke informacije.

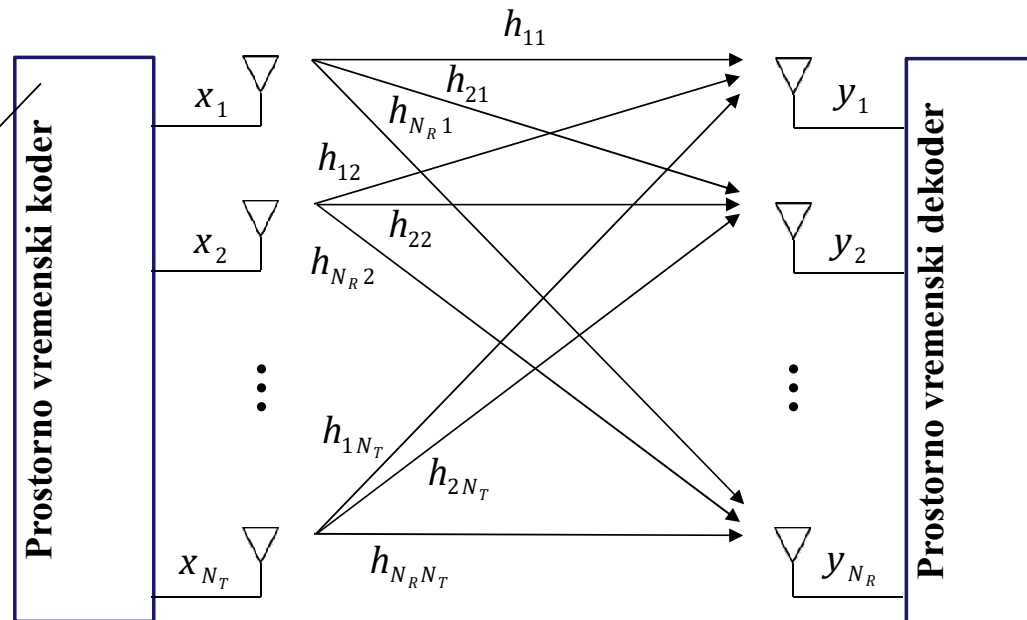


- ❖ Analitički modeli – npr. Mogu se zasnivati na statističkim osobinama sredine propagacije.

# MIMO sistemi – Matrični model sistema

- ❖ Posmatramo šemu uskopojasnog MIMO sistema sa  $N_T$  predajnih i  $N_R$  prijemnih antena
- ❖ Analiziramo slučaj kada se kanal ne menja tokom prenosa manjeg broja simbola – zavisno od vremena koherencije kanala i brzine signaliziranja – odnosno imamo spori ravan (frekvencijski-neselektivan) fading.

$x_p, y_i$  i  $h_{ij}$  su poslani i primljeni simboli i kompleksni koeficijenti kanala na putanji definisanom indeksom predajne antene  $i$  i prijemne antene  $j$



# MIMO sistemi - Matrični model sistema

❖ Matrični model sistema definisan je izrazima:

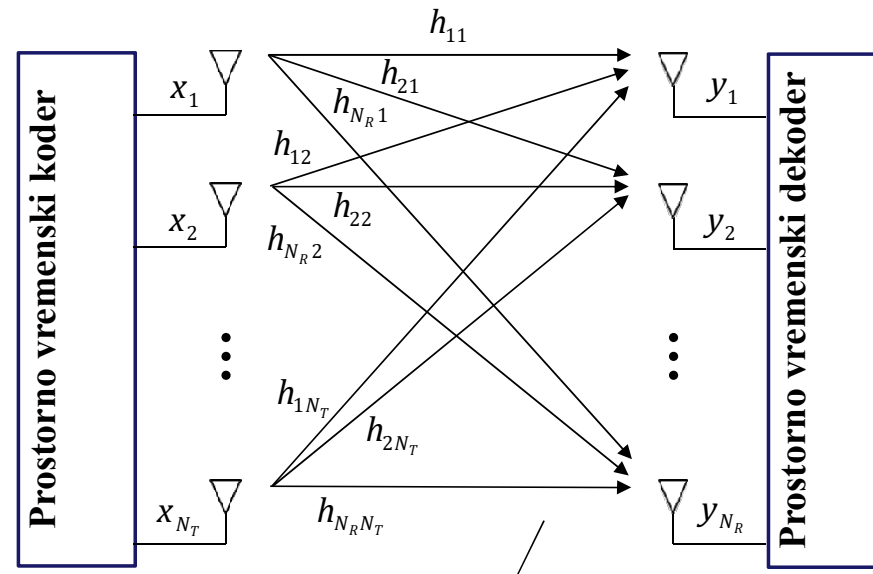
$$y_1 = \sqrt{\frac{E_S}{N_T}} \sum_{j=1}^{N_T} h_{1j} x_j + n_1$$

$$y_2 = \sqrt{\frac{E_S}{N_T}} \sum_{j=1}^{N_T} h_{2j} x_j + n_2$$

M

$$y_{N_R} = \sqrt{\frac{E_S}{N_T}} \sum_{j=1}^{N_T} h_{N_R j} x_j + n_{N_R}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R 1} & h_{N_R 2} & \dots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix}$$

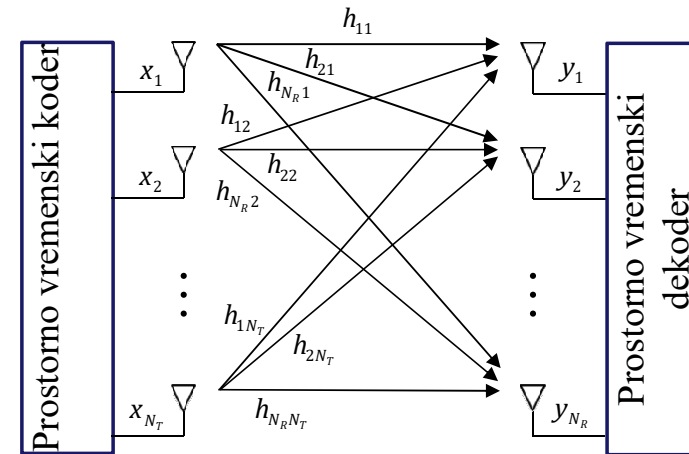


$x_j, y_i$  i  $h_{ij}$  su poslani i primljeni simboli i kompleksni koeficijenti kanala na putanji definisanoj indeksom predajne antene  $i$  i prijemne antene  $j$

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_S}{N_T}} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

# MIMO sistemi – Matrični model sistema

- ❖ Matrica kanala  $H$  je promenjiva u vremenu. Često se posmatrana kolona  $j$  ove matrice naziva prostorna signatura  $j$ -te predajne antene u odnosu na antenski niz prijemnih antena – prostorni raspored predajnih antena predstavlja svojevrsni potpis predajne antene u odnosu na prijemni signal.
- ❖ Diskretne vrednosti ABGŠ na  $i$ -tom ulazu u prijemnik su  $n_i$  pri čemu je matrica kovarijanse vektora  $n$  data kao

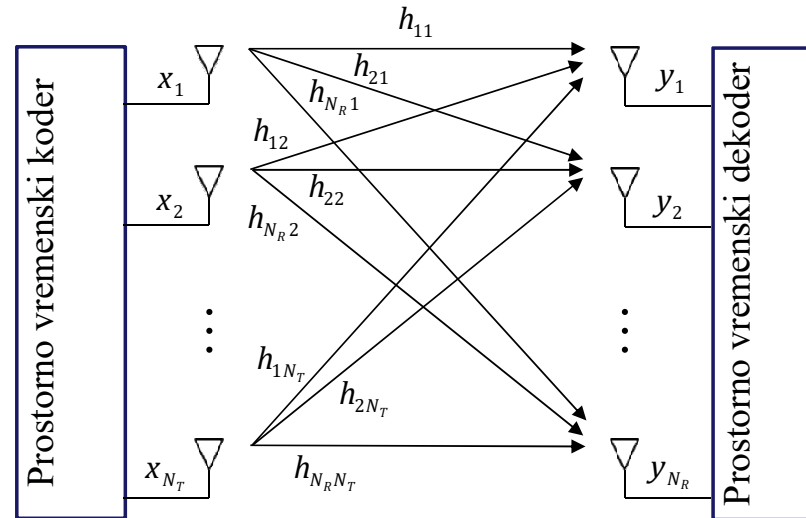


$$\mathbf{R}_{nn} = E \{ \mathbf{nn}^H \} = N_0 \mathbf{I}_{N_R}$$

Operator  $\mathbf{x}^H$  označava hermitian vektora  $\mathbf{x}$  – konjugovano kompleksni transponovani vektor. Matrica kovarijanse koja potiče od šuma je dijagonalna matrica pri čemu je pretpostavljena ista vrednost SGSS ABGŠ na ulazu svake prijemne antene – ne postoji korelacija procesa šuma između procesa šuma za različite antene – imamo prostorno belu interferenciju.

Ako na ulazu postoji interferencija komponente vektora  $\mathbf{n}$  nisu nastale samo pod uticajem ABGŠ i nisu nekorelisane – imamo prostorno obojenu interferenciju.

# MIMO sistemi - Matrični model sistema



- ❖ Matrica kovarijanse predajnog signala je

$$\mathbf{R}_{xx} = E \{ \mathbf{xx}^H \}$$

- ❖ Ako je ukupna srednja energija signala na predajnika  $E_x$  tada imamo da važi

$$\text{Tr} \{ \mathbf{R}_{xx} \} = N_T$$

- ❖ Matrica kovarijanse signala na prijemu i signala nakon dodavanja interferencije su:

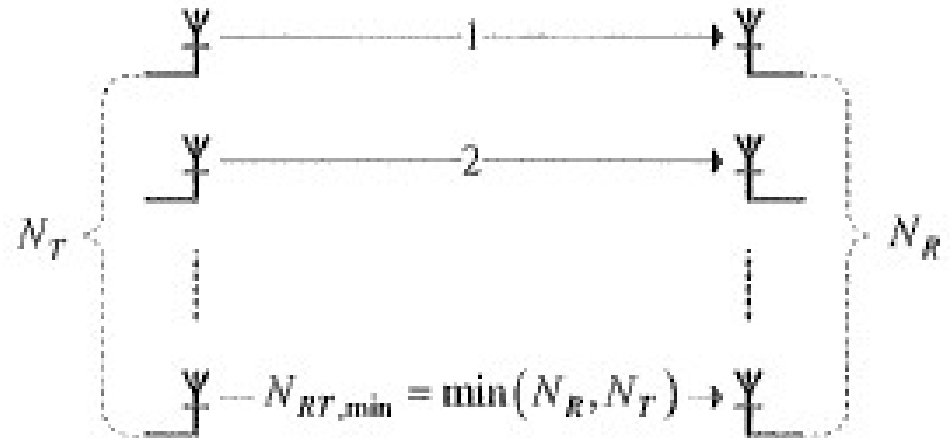
$$\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H$$

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H + \mathbf{R}_{nn}$$

# MIMO sistemi – Teorijski kapacitet

- ❖ Linearna transformacija MIMO kanala u  $N_{RT,min}$  SISO potkanala zasniva se na složenoj dekompoziciji matrice kanala na njene sopstvene vrednosti.

$$N_{RT,min} = \min(N_T, N_R)$$



- ❖ Ukupan kapacitet  $N_{RT,min}$  SISO potkanala predstavlja sumu pojedinačnih klapaciteta pa se za rezultujući MIMO kanal dobija:

$$C = B \times N_R \times \sum_{i=1}^{N_{RT,min}} \text{ld}(1 + P_i \varepsilon_i^2) \quad \sum_{i=1}^{N_{RT,min}} P_i \leq P_T$$

gde je  $P_i$  snaga u  $i$ -tom potkanal a  $\varepsilon_i$  singularna (sopstvena) vrednost matrice  $H$  za  $i$ -ti potkanal, dok je  $P_T$  ukupna predajna snaga. Imamo mogući gubitak ako se deo predajne snage ne usmeri ka prijemim antenama.

# MIMO sistemi – Teorijski kapacitet

- ❖ Ukoliko se sa  $P_x$  označe srednja snaga korisnog signala na ulazu u prijemnik, a  $P_n$  srednja snaga ABGŠ na ulazu u prijemnik (pretpostavljamo da nema drugog signala interferencije) možemo odrediti ukupan kapacitet MIMO kanala, uz pretpostavku da je maksimalna vrednost protoka kroz kanal širine  $B$  vrednosti  $2B\text{bit/s}$ , odnosno dobijamo:

$$C_{\max} = B \times \lg(1 + P_x / P_n) = B \times \lg(1 + S/N)$$

$$P_x = \sigma_x^2 \quad P_n = \sigma_n^2 = N_0 B$$

- ❖ Osnovni sistemski parametar MIMO sistema je kapacitet pri čemu se mogu definisati različiti scenariji rada:
  - Predajnik i prijemnik raspolažu informacijom o stanju u kanalu (CSI). U tom slučaju predajnik može usvojiti strategiju emitovanja da se prilagodi poznatom stanju kanala. Ovo možemo posmatrati u slučaju kada kanal dovoljno dugo vremena ne menja svoje statističke osobine (kvazi-ergodičan).

# MIMO sistemi – Teorijski kapacitet

- Predajnik (prijemnik) raspolaže informacijama o stanju kanala, odnosno predajniku (prijemniku) su poznati svi elementi matrice kanala. Strategija emitovanja (prijava) zasnovana se na praćenju distribucije stanja kanala (CDI, *Channel Distribution Information*).
  - Ako samo predajnik raspolaže sa CSI, emituje signal konstantnim protokom u skladu sa CDI a kapacitet se posmatra kao srednja vrednost na skupu svih stanja kanala. Ukoliko bi predajnik emitovao signal konstantnog protoka u svim kanalima, prijemnik bi u skladu sa informacijama o stanju kanala isključivao kanale u kojima je  $S/N$  ispod zahtevane vrednosti. Ovo se naziva gubitak kapaciteta i opisuje se verovatnoćom gubitka kapaciteta.
  - Verovatnoća gubitka kapaciteta je verovatnoća da protok signala u kanalu nije održiv. U realnim sistemima estimacija stanja kanal obavlja se korišćenjem pilot simbola ili pilot nosioca.
- Predajnik nema informacije o kanalu. Raspoloživa snaga signala u ovom slučaju se podjednako deli na sve predajne antene. U realnim uslovima rada predajnik informacije o stanju kanala dobija putem povratne veze od prijemnika, gde se obavlja estimacija kanala, pri čemu se koristi princip reciprociteta (za FDD). U TDD sistemima je informacija o stanju kanala znatno pouzdanija – za oba pravca komunikacije se koristi isti RF opseg.



# MIMO sistemi – Teorijski kapacitet

## ❖ Deterministički frekvencijski-neselektivan (ravan) MIMO kanal

- Na prijemnim antenama je osim signala prisutan isključivo ABGŠ
- Energija simbola  $E_S$  je ravnomerno distribuirana na  $N_T$  antena predajnika pa je kovarijansna matrica predajnog signala

$\lambda_j$  su sopstvene vrednosti matrice  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{xx}} = \frac{E_S}{N_T} \mathbf{I}_{N_T} \quad \text{Tr}(\mathbf{R}_{\mathbf{xx}}) = E_S$$

$$C_{MIMO} = B_{ch} \times \text{ld} \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_R} + \frac{E_S}{N_0 N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] = B_{ch} \times \sum_{i=1}^r \text{ld} \left( 1 + \frac{E_S}{N_0 N_T} \lambda_i \right)$$

$$N_T = N_R = 1 \Rightarrow C_{SISO} = B_{ch} \times \text{ld} \left( 1 + \frac{E_S}{N_0 N_T} |h_{11}|^2 \right)$$

$$N_T = 1, N_R \geq 2 \Rightarrow C_{SIMO} = B_{ch} \times \sum_{i=1}^{N_R} \text{ld} \left( 1 + \frac{E_S}{N_0 N_T} |h_{i1}|^2 \right) \quad H = [h_{11}, h_{12}, \dots, h_{1N_R}]^T$$

$$N_T \geq 2, N_R = 1 \Rightarrow C_{MISO} = B_{ch} \times \sum_{i=1}^{N_T} \text{ld} \left( 1 + \frac{E_S}{N_0 N_T} |h_{i1}|^2 \right) \quad H = [h_{11}, h_{21}, \dots, h_{N_T 1}]^T$$

# MIMO sistemi – Teorijski kapacitet

## ❖ Stohastički frekvencijski-neselektivan (ravan) MIMO kanal

- Predajnik nema informaciju o stanju kanala

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{P_T}{N_T} \mathbf{I}_{N_T} \quad \text{Tr}(\mathbf{R}_{xx}) = P_T$$

$$C_{MIMO} = B_{ch} \times ld \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_T} + \frac{P_T}{N_T} \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{H} \right) \right] = B_{ch} \times ld \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_T} + \frac{P_T}{N_T \sigma_x^2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \right]$$

$$N_T = N_R \gg 1 \Rightarrow C_{MIMO} = B_{ch} \times N_R \times ld \left[ 1 + \frac{S}{N} \right] \quad \text{— Signaliziranje na slepo}$$

- Samo predajnik ima informaciju o stanju kanala

$$C_{MIMO} = B_{ch} \times r \times ld \left[ \det \left( 1 + \frac{P_T}{\sigma_x^2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \right] \quad \text{— } r \text{ je rang matrice } \mathbf{H}$$

- Predajnik i prijemnik imaju informaciju o stanju kanala

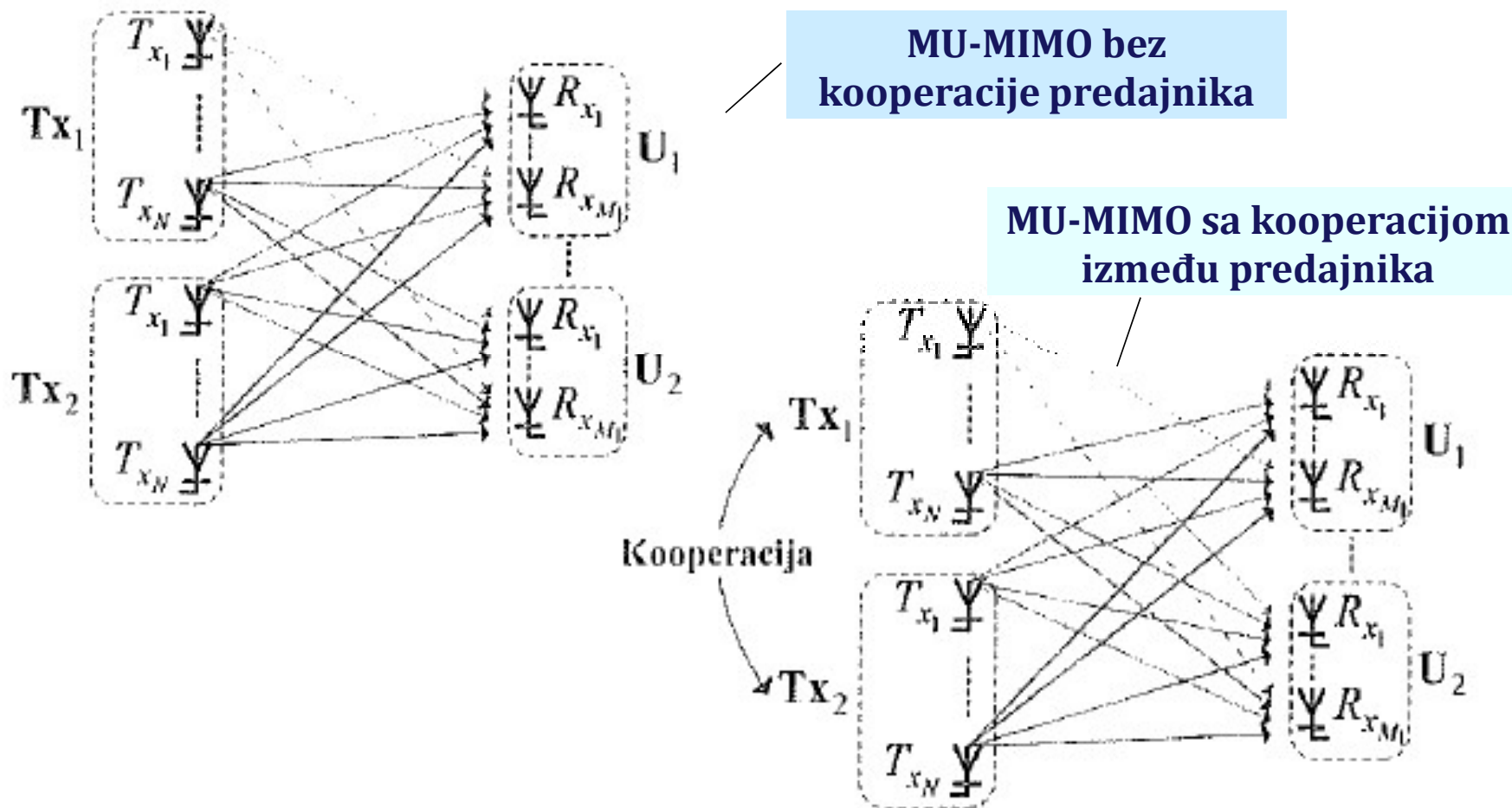
$$C_{MIMO} = B_{ch} \times \sum_{p=1}^r ld \left( \frac{\lambda_{H,p} \times \mu}{\sigma_n^2} \right) \quad \begin{array}{l} \lambda_{H,p} \text{ — } p\text{-ta singularna vrednost matrice } \mathbf{H} \\ \mu \text{ — Skalarna konstanta} \end{array}$$

# MIMO sistemi – Višekorisnički sistem

- ❖ Višekorisnički MIMO sistem (MU-MIMO, *Multi-User MIMO*) podrazumeva istovremeno korišćenje kanala od strane više korisnika.
- ❖ U predajniku se preko višeantenskog sistema istovremeno obavlja emitovanje signala do korisnika pri čemu korisnici koriste različite forme multipleksiranja – višekorisničkog pristupa.
- ❖ Korišćenje antenskih nizova omogućava prostorno multipleksiranje koje združeno sa prostornim diversitijem povećava mogući broj korisnika.
- ❖ Ukoliko se u radu koristi CSI omogućava se zajedničko procesiranje svih korisničkih signala – imamo bolje performanse sistema. Pобољшanje performansi se posebno odnosi na eliminisanje višekorisničke interferencije (*Multi-User Interference, MUI*).
- ❖ MU-MIMO sistemi se ponekad posmatraju i kao forma sistema sa višestrukim pristupom na bazi prostorne raspodele SDMA (*Space Division Multiple Access*).

# MIMO sistemi – Višekorisički sistem

- ❖ Postoji više formi višekorisičkih MIMO sistema (MU-MIMO).



# MIMO sistemi – Višekorisnički sistem

- ❖ U slučaju višekorisničkih MIMO sistema (MU-MIMO) posmatramo matricu kanala  $\mathbf{H}_k$  za svakog korisnika.

- ❖ Imamo da svaki korisnik ima svoj broj antena na prijemu  $N_{Rk}$  dok je broj antena na predaji isti  $N_T$ .

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \Lambda & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_{Rk}1} & h_{N_{Rk}2} & \Lambda & h_{N_{Rk}N_T} \end{bmatrix}$$

- ❖ Ukupni signal na prijemu za  $k$ -tog korisnika, u koji ulazi njegov signal i signali namenjeni drugim korisnicima je,

$$y_k = \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_k x_j + n_k \quad \mathbf{x} = \sum_{k=1}^K x_k$$

Ukupno emitovani signal  
ka svim korisnicima

- ❖ Posmatramo slučaj kada se emitovani signal formira iz vektora  $\mathbf{d}$  od  $m_j$  simbola koji se prenose ka  $j$ -tom korisniku. Za slučaj SISO i MISO kanala broj simbola koji se paralelno prenose ograničen je rangom matrice kanala, a u posmatraom MU-MIMO sistemu ograničeno rangom matrice  $\mathbf{H}_j$ .

# MIMO sistemi – Višekoristički sistem

- ❖ Vektor  $\mathbf{d}$  označava simbole koji se prenose ka svim korisnicima

$$\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1^T \quad \mathbf{d}_2^T \quad \Lambda \quad \mathbf{d}_K^T]^T$$

- ❖ Dimenzija vektora  $\mathbf{d}$  iznosi:

$$\dim(\mathbf{d}) = \sum_{j=1}^K m_j$$

- ❖ Vrednosti  $m_j$  zavise od raspoložive snage predajnika i zahtevanog odnosa S/N na prijemu, pri čemu moraju biti ispunjeni uslovi

$$m_j \leq n_{R_j}, \quad \sum_k m_k \leq n_T$$

- ❖ U SU-MIMO sistemima kapacite sistema je ograničen raspoloživom snagom predajnika.
- ❖ U MU-MIMO sistemima snaga se može na različite načine raspodeliti po korisnicima – odnosno korisnici mogu imati različite protoke, pa u sistemu postoje regioni sa različitim kapacitetima.

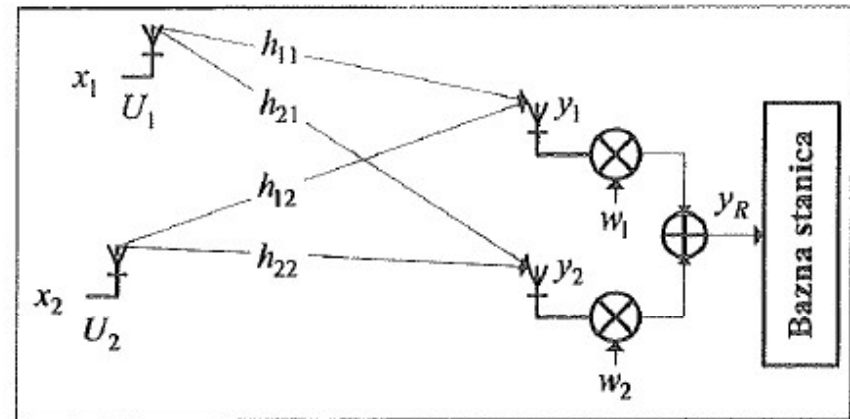
# MIMO sistemi – Primer MU-MIMO sistema

Prikazana je blok šema prenosa u *uplink*-u MU-MIMO sistema u kome korisnici  $U_1$  i  $U_2$  emituju signal ka baznoj stanici (pristupnoj tački).

Na prijemu, prijemnim antenama, bazne stanice, ukoliko se zanemari uticaj šuma, dobijaju se signali  $y_1$  i  $y_2$

$$y_1 = \sum_{j=1}^2 \mathbf{H}_k x_j + n_1 \cong h_{11}x_1 + h_{12}x_2$$

$$y_2 = \sum_{j=1}^2 \mathbf{H}_k x_j + n_2 \cong h_{21}x_1 + h_{22}x_2$$



Ukupan signal na ulazu u BS ako se koriste težinski koeficijenti  $w_1$  i  $w_2$

$$y_R = w_1 y_1 + w_2 y_2 = w_1 (h_{11}x_1 + h_{21}x_2) + w_2 (h_{12}x_1 + h_{22}x_2)$$

Ukoliko želimo da izdvojimo signal prvog korisnika,  $U_1$ , treba zadovoljiti uslove na osnovu kojih se mogu odrediti vrednosti težinskih koeficijenata za ovaj slučaj.

$$w_1 h_{11} + w_2 h_{21} = 1$$

$$w_1 h_{12} + w_2 h_{22} = 0$$

# MIMO sistemi – Primer MU-MIMO sistema

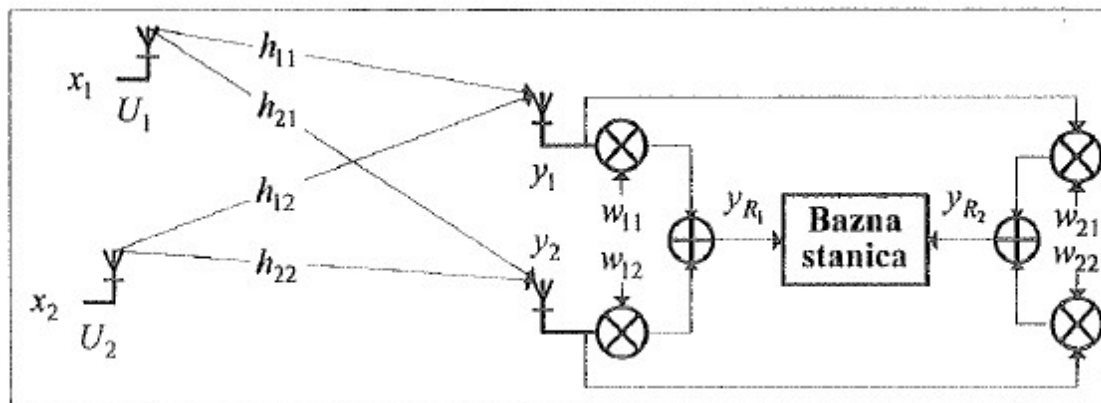
Ukoliko želimo da istovremeno izdvojimo signale oba korisnika,  $U_1$  i  $U_2$ , treba zadovoljiti uslove, skup jednačina, čijim se rešavanjem mogu odrediti vrednosti sva četiri težinska koeficijenta za ovaj slučaj detekcije.

$$y_{R1} = w_{11}y_1 + w_{12}y_2 = w_{11}(h_{11}x_1 + h_{12}x_2) + w_{12}(h_{21}x_1 + h_{22}x_2)$$

$$y_{R2} = w_{21}y_1 + w_{22}y_2 = w_{21}(h_{11}x_1 + h_{12}x_2) + w_{22}(h_{21}x_1 + h_{22}x_2)$$

$$w_{11}h_{11} + w_{12}h_{21} = 1, \quad w_{11}h_{12} + w_{12}h_{22} = 0$$

$$w_{21}h_{11} + w_{22}h_{21} = 0, \quad w_{21}h_{12} + w_{22}h_{22} = 1$$



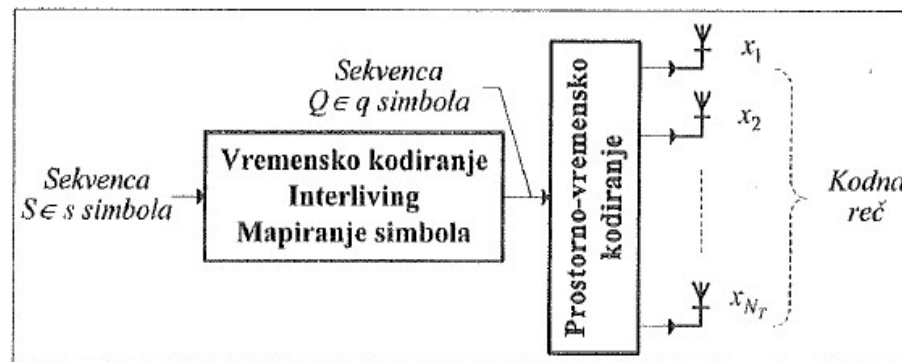


# MIMO sistemi – *Space-Time* kodovi

- ❖ Prostorno-vremensko kodiranje/kodovi (*Space-Time Coding/Codes, CTS*) predstavlja specifičan način obrade i prenosa signala u okviru MIMO sistema koji se izvodi u cilju maksimiziranja dobitka koji se ostvaruje primenom prostorno-vremenskog diversitija.
- ❖ Primenom STC objedinjuju se, tj. združeno se koriste, postupci zaštitnog kodiranja (kodni i vremenski diversiti) sa tehnikom predajnog i/ili prijemnog diversitija u cilju poboljšanja kvaliteta prenosa i ostvarivanja visoke spektralne efikasnosti.
- ❖ STC se mogu posmatrati kao kodna knjiga  $X$  čiji su elementi  $M$  različitih sekvenci simbola, a koje se mogu analitički definisati kao kompleksni vektori dužine  $N_T$  čiji elementi predstavljaju modulisane simbole na svakoj od predajnih antena.
- ❖ **Primer i značaj primene zaštitnog kodiranja dati su u na osnovnom nivou u predmetu Telekomunikacije 2, a teorijske osnove i princip rada biće dat u predmetu Teorija informacija i kodiranje.**

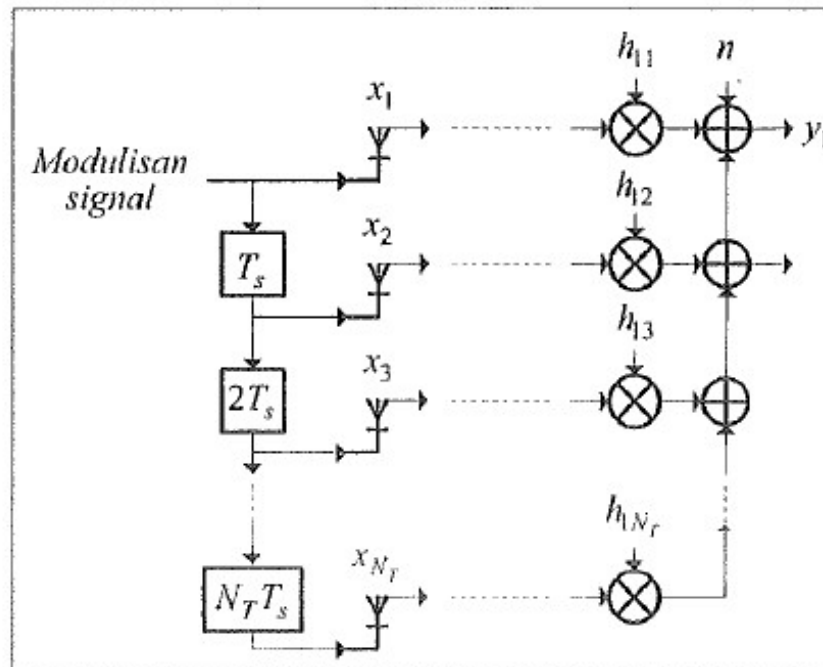
# MIMO sistemi – *Space-Time* kodovi

- ❖ Na osnovu prikazane blok šeme, informaciona sekvenci  $S$  sa  $s$  simbola se kodira uz primenu interlivinga i mapira u skladu sa korišćenim postupkom modulacije – dobija se sekvenca kompleksnih simbola  $Q$  sa  $q$  elemenata. Simboli ove sekvence se dodeljuju (alociraju) na  $N_T$  predajnih antena u vremenskom intervalu trajanja  $kT_s$  gde je  $k \geq 1$  a  $T_s$  period signaliziranja. Sekvenca emitovanih simbola  $(x_1, x_2, \dots, x_{N_T})$  predstavlja kodnu reč kodne knjige (matrice reda  $N_T \times k$ ). Pri tome,  $s/kT_s$  predstavlja protok na predaji a  $q/kT_s$  predstavlja protok prostornog multipleksa.
- ❖ Na prijemu se obavlja postupak dekodiranja, kojim se u slučaju da je poznato stanje kanala (CSI) može obaviti na optimalan način i minimizovati verovatnoća greške. U praksi stanje kanala nije idealno poznato.



# MIMO sistemi – *Space-Time* kodovi

- ❖ Jedan od prvih pokušaja implementacije STC je zasnovan na predajnom diversitetu sa kašnjenjem – prenošeni simboli se emituju sa različitih predajnih antena u različitim vremenskim intervalima zavisno od unetog kašnjenja. Na ovaj način ostvaruje se dodatni vremenski diversitet uz prostorni diversitet na predaji koji se realizuje kroz razdvajanje predajnih antena u prostoru.



# MIMO sistemi – *Space-Time* kodovi

- ❖ Predloženo je više pristupa primeni STC (ovde je samo data podela a detalje o principima kodiranja i ovim tehnikama – **Teorija informacija i kodovanje** i drugi predmeti na master i doktorskim studijama):
  - Prostorno-vremenski blok kodovi (*Space-Time Block Codes, STBC*), uključujući ortogonalne STBC (OSTBC);
  - Prostorno-vremenski trellis kodovi (*Space-Time Trellis Codes, STTC*), koja se zasniva na Trellis kodiranoj modulaciji uz prostornu alokaciju moduliranih simbola na predajne antene. U odnosu na STBC ovde postoji međusobna korelacija (zavisnost) susednih blok kodova;
  - Prostorno-vremenski turbo trellis kodovi (*Space-Time Turbo Trellis Codes, STTTC*)
  - Slojeviti prostorno-vremenski kodovi (*Layered Space-Time Codes, LSTC*) za realizaciju sistema sa visokim protokom – HBLAST (*Horizontal Bell Laboratories Layered Space-Time*), VBLAST (*Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time*) i DBLAST (*Diagonal Bell Laboratories Layered Space-Time*).

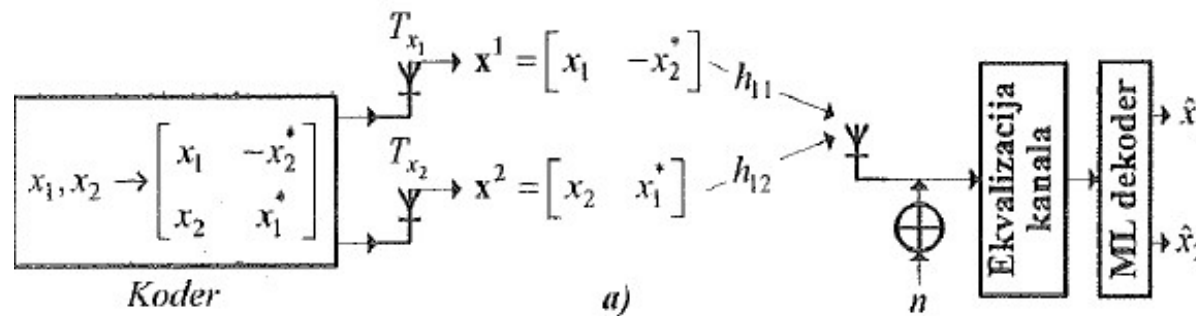
# MIMO sistemi – Primer STBC - Alamouti

Prikazana je blok šema najpoznatije, i jednostavne, realizacije STBC – tzv. *Alamouti-jeva* šema prostorno-vremenskog kodiranja.

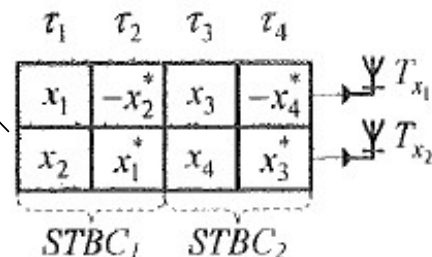
Proces odlučivanja u prijemniku svodi se na nezavisno odlučivanje o svakom od primljenih simbola prema relacijama:

$$x_{1,odluka} = h_1^H y_1 + y_2^H h_2$$

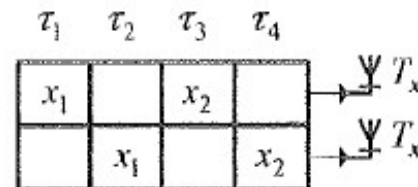
$$x_{2,odluka} = h_2^H y_1 - y_2^H h_1$$



**STBC – Alamouti šema**



**Repeticiono kodiranje**



# MIMO sistemi – Primene u WLAN/JMS

- ❖ U razvoju i primeni MIMO tehnologija u bežičnim komunikacionim sistemima mogu se uočiti dve grupe standarda:
  - IEEE standardi, npr. IEEE 802.11x za WLAN i IEEE 802.16 za *WiMax* za širokopolasni bežični pristup (WMAN) u opsegu 2.6GHz. Varijanta standarda IEEE 802.16m je varijanta IEEE 802.16e standarda i namenjen je za pristup mobilnih korisnika – *Mobile WiMax*.
  - 3GPP standardi za ćelijske sisteme za mobilne korisnike, npr. UMTS, LTE i LTE-Advanced. LTE-Advanced sistemi su dizajnirani da ispune zahteve 4G standarda – paketska mreža sa maksimalalnim protokom 1Gb/s za slabo pokretne korisnike i prosečnu spektralnu efikasnost reda 3b/s/Hz.
- ❖ Prostorno multipleksiranje za pojedinačnog korisnika prvi put je usvojeno u okviru UMTS standarda – HDSPA (*High-Speed Data Packet Access*) u *downlink*-u.

# MIMO sistemi – Primene u WLAN/JMS

- ❖ LTE standard predstavlja evolutivni korak u razvoju UMTS sistema koji se bazira na višestrukome pristupu primenom OFDMA tehnologije u *downlink*-u odnosno SC-FDMA u *uplink*-u. Cilj ovog standarda je da se obezbedi veća vrednost protoka i bolja spektralna efikasnost i da se čitav prethodni UMTS standard prebaci u paketsku mrežu (u okviru UMTS postoji i paketski deo i deo sa komutacijom kola).
- ❖ LTE-Advanced je nadogradnja LTE standarda.
- ❖ Rešenja za bežične mreže zasnovane na IEEE 802.11n standardu koriste nekoliko tehnologija za povećanje kapaciteta – primena MIMO tehnologije, agregacija paketa i združivanja kanala, a sve u cilju povećanja kapaciteta mreže.

**Navedeni ćelijski sistemi za mobilne korisnike (JMS) i WLAN/WMAN se detaljnije izučavaju u predmetima iz oblasti bežičnih komunikacija (Javni mobilni sistemi, TK sistemi, Bežične mreže i drugi)**

# MIMO sistemi – Primeri primene u JMS

	UMTS	802.16e	802.16m	LTE	LTE-A
Opseg [MHz]	5	< 20	< 100	< 20	< 100
Višekorisnički pristup	CDMA	OFDMA		DL: OFDMA, UL: SC-OFDMA	
<i>Downlink</i> SU-MIMO	2 toka	2 toka	8 tokova	4 toka	8 tokova
<i>Downlink</i> MU-MIMO	-	-	4 korisnika	4 korisnika	4 korisnika
<i>Uplink</i> SU-MIMO	-	-	4 toka	-	4 toka
<i>Uplink</i> MU-MIMO	-	-	8 korisnika	4 korisnika	8 korisnika