



HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology




BÀI GIẢNG

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN

VÔ TUYẾN

Giảng viên:	Nguyễn Việt Hưng
Email:	nvhung_vt1@ptit.edu.vn
Tel:	***
Bộ môn:	Vô tuyến
Khoa:	Viễn Thông 1



www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

Kỹ thuật đa anten

Hệ thống MIMO

2

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
 Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

2

www.ptit.edu.vn CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Khái niệm MIMO

Tùy thuộc vào số lượng anten phát, anten thu, phân cực và các chế độ của anten, các hệ thống thông tin vô tuyến có thể được phân chia thành:

- SISO (Single input single output): hệ thống chỉ có một anten phát, một anten thu
- SIMO (Single input multi output): Hệ thống có một anten phát và nhiều anten thu
- MIMO (multi output multi output): Hệ thống có nhiều anten phát và nhiều anten thu.

Sự khác nhau giữa SISO và MIMO được thể hiện trên hình 1.

4 Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1 4

www.ptit.edu.vn CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN


❖ Khái niệm MIMO

a)

b)

M và M^{-1} phải được thiết kế để đảm bảo đạt được hiệu năng tối ưu của đường truyền vô tuyến (tốc độ bit, độ tin cậy) với độ phức tạp cho phép

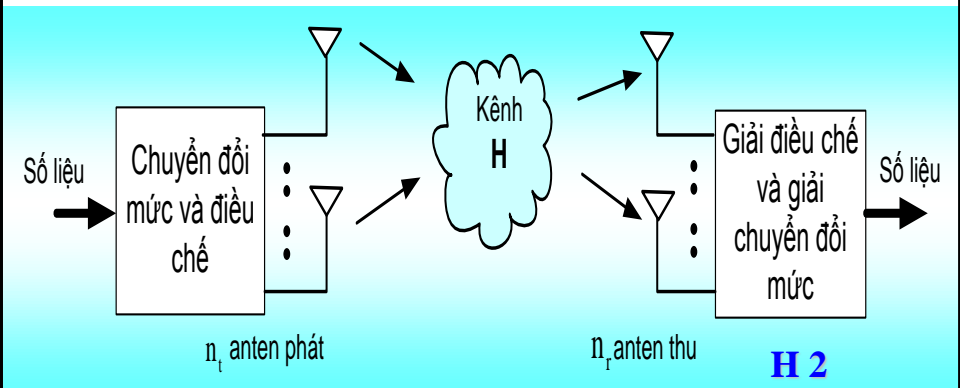
5 Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1 5

www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Phân loại sơ đồ MIMO

Về cấu trúc có thể phân loại MIMO thành sơ đồ chỉ có một bộ điều chế và sơ đồ có nhiều bộ điều chế như trên hình 2 và 3.




n_t anten phát n_r anten thu **H 2**

6

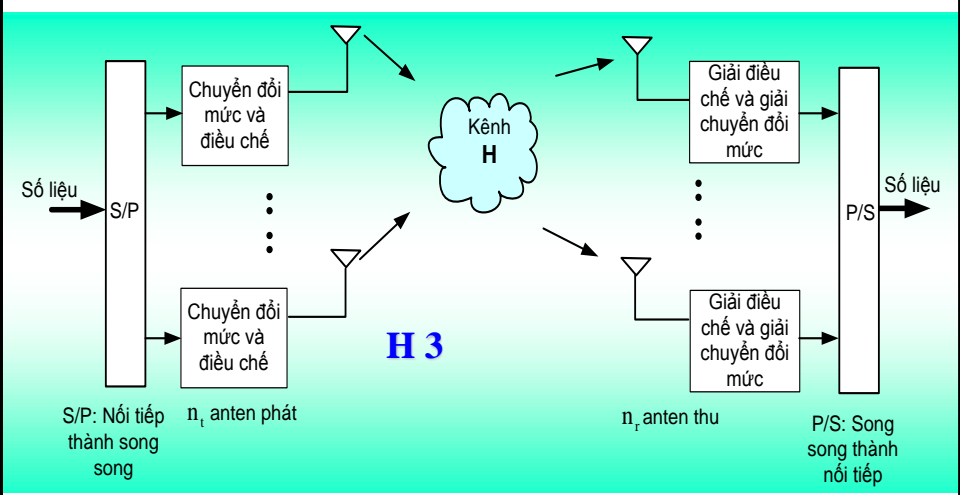
Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

6

www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Phân loại sơ đồ MIMO




n_t anten phát n_r anten thu **H 3**

S/P: Nối tiếp thành song song P/S: Song song thành nối tiếp

7

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

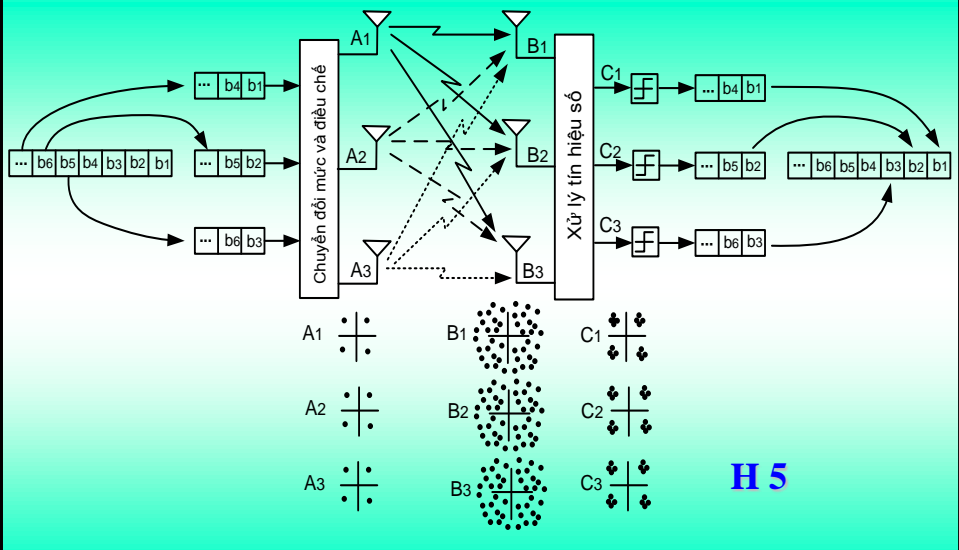
7



www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN


Sơ đồ ghép kênh không gian BLAST



8

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

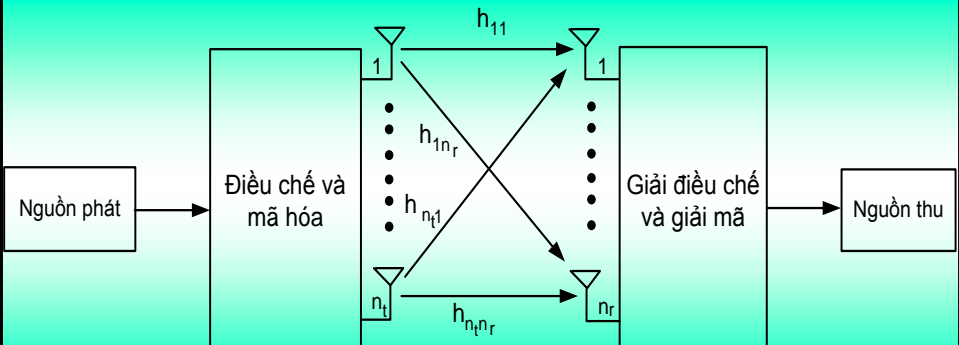
8



www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

Sơ đồ tổng quát kênh MIMO



1

h_{11}

h_{1n_r}

h_{n_t1}

$h_{n_t n_r}$

n_t

n_r

1

n_r

Nguồn phát

Điều chế và mã hóa

Giải điều chế và giải mã

Nguồn thu

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \cdots & h_{n_t1} \\ h_{12} & h_{22} & \cdots & h_{n_t2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1n_r} & h_{2n_r} & \cdots & h_{n_t n_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_{n_r} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}$$

www.ptit.edu.vn CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Các hàm kênh MIMO

➤ Đáp ứng xung kim kênh SISO

$$h(t, \tau) = \sum_{\ell=0}^{L-1} a_{\ell}(t, \tau) e^{j\phi_{\ell}(t, \tau)} \delta(\tau - \tau_{\ell}(t))$$

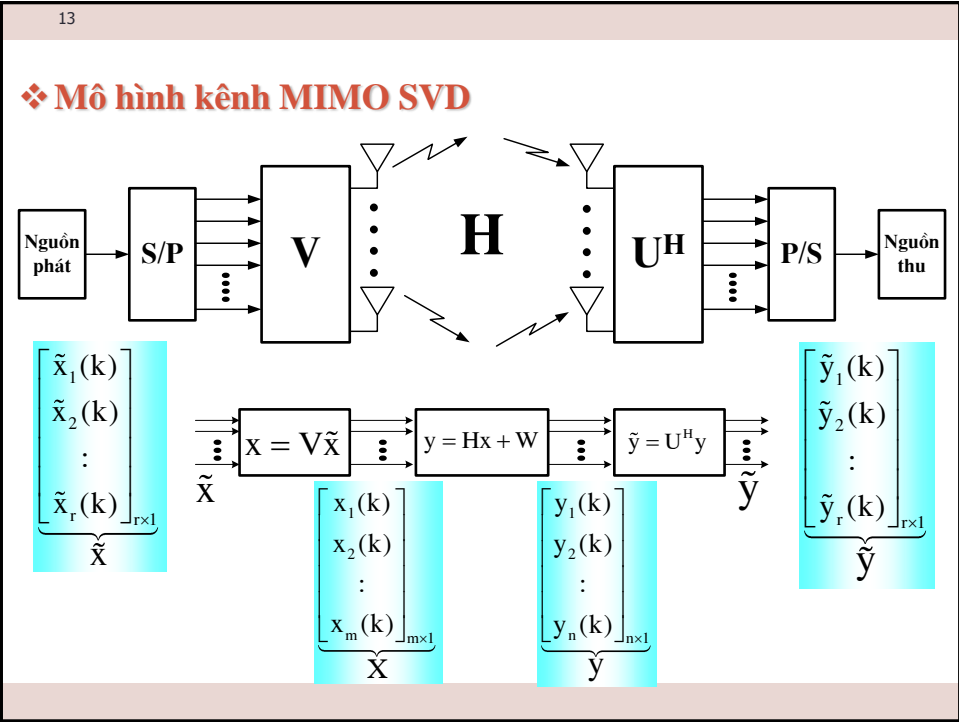
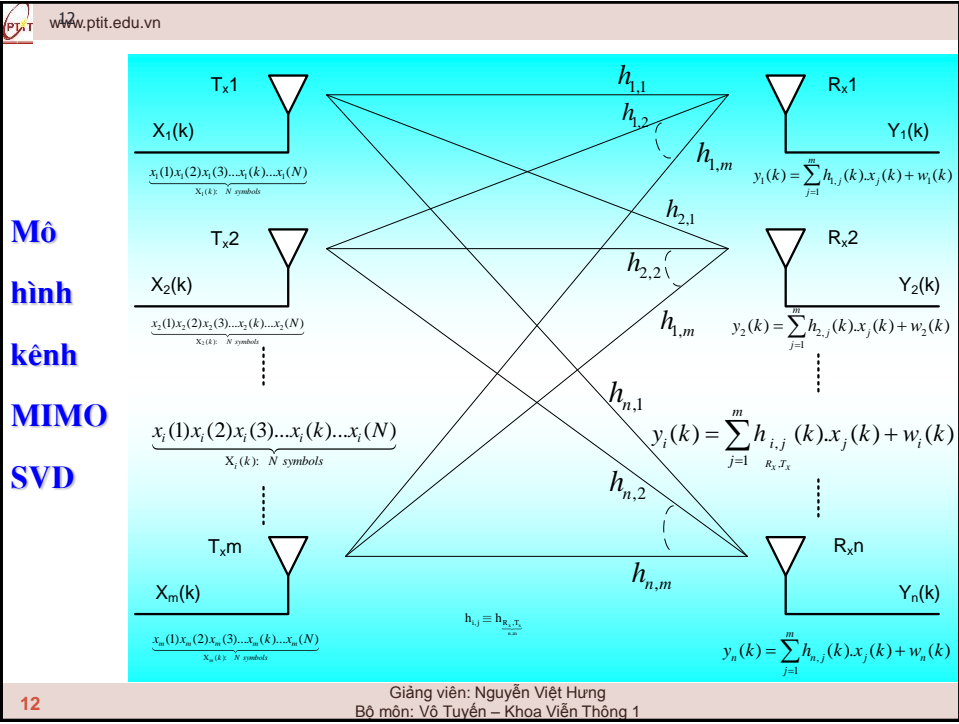
➤ Đáp ứng xung kim kênh MIMO

$$H = [h_{n,m}] = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \dots & h_{n_t,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} & \dots & h_{n_t,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1,n_r} & h_{2,n_r} & \dots & h_{n_t,n_r} \end{bmatrix}$$

$$h_{n,m}(t, \tau) = \sum_{\ell=0}^{L-1} a_{n,m,\ell}(t, \tau) e^{j\phi_{n,m,\ell}(t, \tau)} \delta(\tau - \tau_{n,m,\ell}(t))$$

10 Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1 10

Mô hình kênh MIMO SVD



14

❖ SVD của ma trận kênh H

$$\begin{aligned} \mathbf{U}, \mathbf{U}^H &= \mathbf{U}^H, \mathbf{U} = \mathbf{I} \\ \mathbf{V}, \mathbf{V}^H &= \mathbf{V}^H, \mathbf{V} = \mathbf{I} \\ N &= \min(n_r, n_t) \end{aligned}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^H = \underline{\mathbf{u}}_1 \dots \underline{\mathbf{u}}_N \begin{bmatrix} \lambda_1^{1/2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{1/2} & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_N^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{v}}_1^H \dots \underline{\mathbf{v}}_N^H \end{bmatrix}$$

Trong đó U và V là các ma trận nhất phân, “h” là chuyển vị Hermitian và $N = \min n_r, n_t$

$$\det(\mathbf{Q} - \lambda \mathbf{I}) = 0$$

$$\mathbf{Q} = \begin{cases} \mathbf{H} \mathbf{H}^H, & N_r < N_t \\ \mathbf{H}^H \mathbf{H}, & N_t \geq N_r \end{cases} \quad \text{Q: Ma trận Wirshart}$$

15

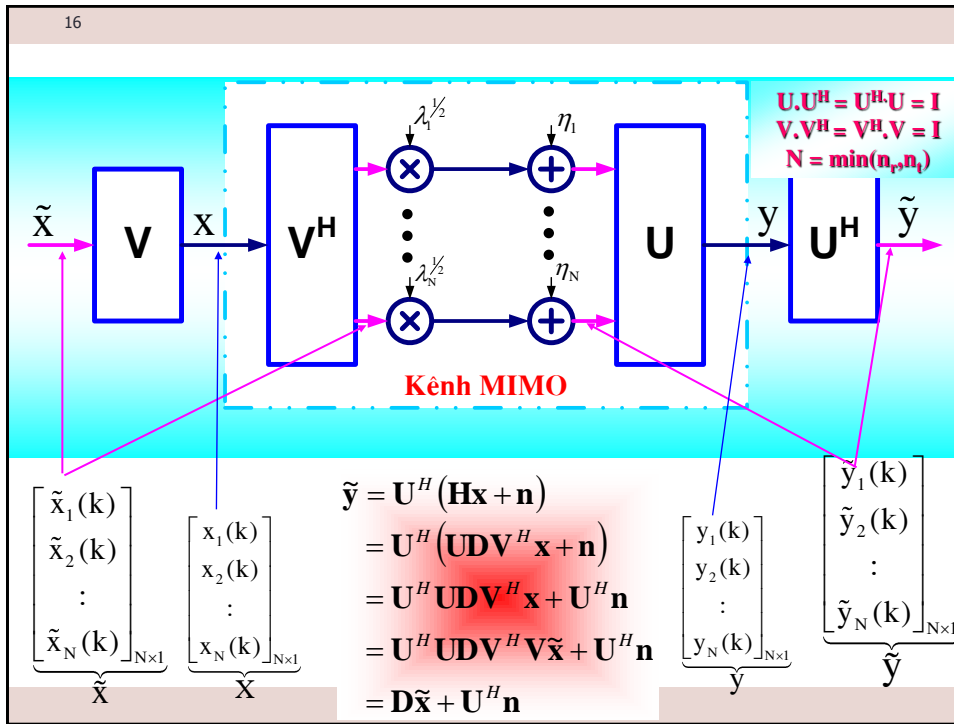
❖ SVD của ma trận kênh H

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_0^{1/2} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_1^{1/2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_{N_t-1}^{1/2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Nếu } N_t > N_r$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{N_r} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{N_t - N_r}$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_0^{1/2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_1^{1/2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_{N_t-1}^{1/2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Nếu } N_t < N_r$$

$\left. \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \right\} N_r - N_t \text{ hàng bằng không}$



17

❖ Mô hình hóa máy phát

$\mathbf{x}(k) = \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}}(k)$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1,1} & \mathbf{v}_{1,2} & \dots & \mathbf{v}_{1,r} \\ \mathbf{v}_{2,1} & \mathbf{v}_{2,2} & \dots & \mathbf{v}_{2,r} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{v}_{m,1} & \mathbf{v}_{m,2} & \dots & \mathbf{v}_{m,r} \end{bmatrix}_{m \times r} \times \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \\ \vdots \\ \tilde{x}_r(k) \end{bmatrix}_{r \times 1} = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_m(k) \end{bmatrix}_{m \times 1}$$

$\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{m \times r}$ is called the transmit precoding matrix
 \mathbf{V} is (rotation) unitary matrices
 satisfies $\mathbf{V} \mathbf{V}^H = \mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}$

$\tilde{\mathbf{x}}(k) \in \mathbb{C}^r$ be r independent
 symbol sequences
 that we wish to send

$$x_i(k) = \sum_{j=1}^r v_{i,j} \tilde{x}_j(k)$$

18

❖ Mô hình hóa nhiễu và tạp âm

$$I(k) = H_I \cdot x_I(k)$$

$$= \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,K} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{n,1} & h_{n,2} & \dots & h_{n,K} \end{bmatrix}_{n \times K} \times \begin{bmatrix} x_{I,1}(k) \\ x_{I,2}(k) \\ \vdots \\ x_{I,K}(k) \end{bmatrix}_{K \times 1} = \begin{bmatrix} I_1(k) \\ I_2(k) \\ \vdots \\ I_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$H_I \in \mathbb{C}^{n \times K}$ are the complex channel gains from the sources to the receive antennas

$x_I(k) \in \mathbb{C}^K$ are the signals transmitted by the K interference sources

$$w(k) = I(k) + z(k)$$

$$= \begin{bmatrix} I_1(k) \\ I_2(k) \\ \vdots \\ I_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1} + \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ \vdots \\ z_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \\ \vdots \\ w_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$I(k) \in \mathbb{C}^n$ is the baseband interference

$z(k) \in \mathbb{C}^n$ is the additive noise at the receive antennas

19

❖ Mô hình hóa máy thu

$$y(k) = H \cdot x(k) + \underbrace{I(k) + z(k)}_{w(k)}$$

$$= \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,m} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{n,1} & h_{n,2} & \dots & h_{n,m} \end{bmatrix}_{n \times m} \times \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_m(k) \end{bmatrix}_{m \times 1} + \begin{bmatrix} I_1(k) \\ I_2(k) \\ \vdots \\ I_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1} + \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ \vdots \\ z_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_n(k) \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$H \in \mathbb{C}^{n \times m}$ is the matrix of complex channel gains

$x(k) \in \mathbb{C}^m$ is the baseband transmitted signal

$I(k) \in \mathbb{C}^n$ is the baseband interference


$z(k) \in \mathbb{C}^n$ is the additive noise at the receive antennas

$y(k) \in \mathbb{C}^n$ is the baseband received signals

$w(k)$

$$y_i(k) = \sum_{j=1}^m h_{i,j}(k) \cdot x_j(k) + w_i(k), \quad i=1, \dots, n$$

R_X, T_X

 www.ptit.edu.vn


❖ Mô hình hóa máy thu

$$\tilde{\mathbf{y}}(\mathbf{k}) = \mathbf{U}^H \mathbf{y}(\mathbf{k})$$
$$= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{1,1}^* & \mathbf{u}_{2,1}^* & \dots & \mathbf{u}_{n,1}^* \\ \mathbf{u}_{1,2}^* & \mathbf{u}_{2,2}^* & \dots & \mathbf{u}_{n,2}^* \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{u}_{1,r}^* & \mathbf{u}_{2,r}^* & \dots & \mathbf{u}_{n,r}^* \end{bmatrix}_{r \times n} \times \begin{bmatrix} y_1(\mathbf{k}) \\ y_2(\mathbf{k}) \\ \vdots \\ y_n(\mathbf{k}) \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1(\mathbf{k}) \\ \tilde{y}_2(\mathbf{k}) \\ \vdots \\ \tilde{y}_r(\mathbf{k}) \end{bmatrix}_{r \times 1}$$

\mathbf{U}, \mathbf{V} are (rotation) unitary matrices satisfies
 $\mathbf{U} \mathbf{U}^H = \mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{I}$ & $\mathbf{V} \mathbf{V}^H = \mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}$
 \mathbf{U}^H is complex conjugate transpose of \mathbf{U} matrix

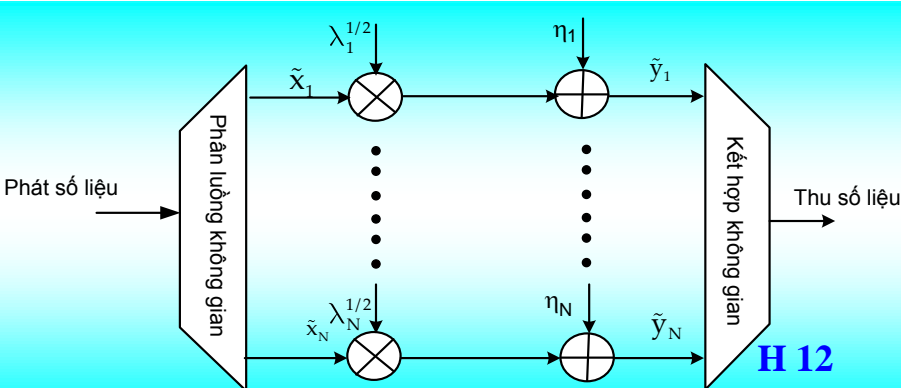
20

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

 www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Mô hình kênh SVD MIMO




The diagram illustrates the SVD MIMO channel model. It starts with 'Phát số liệu' (Data transmission) entering a trapezoidal block labeled 'Phân luồng không gian' (Spatial multiplexing). The output of this block is a vector of signals $\tilde{\mathbf{x}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_N$. Each signal $\tilde{\mathbf{x}}_i$ is multiplied by a gain $\lambda_i^{1/2}$ (represented by a circle with a cross). The resulting signals then pass through a set of adders (circles with a plus sign), where noise η_1, \dots, η_N is added. The final output is a vector of signals $\tilde{\mathbf{y}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{y}}_N$, which enters a trapezoidal block labeled 'Kết hợp không gian' (Spatial combining). The final output is 'Thu số liệu' (Data reception). The entire process is labeled 'H 12'.

$$\mathbf{U}^h \mathbf{y} = \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{D} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\boldsymbol{\eta}}$$

21

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

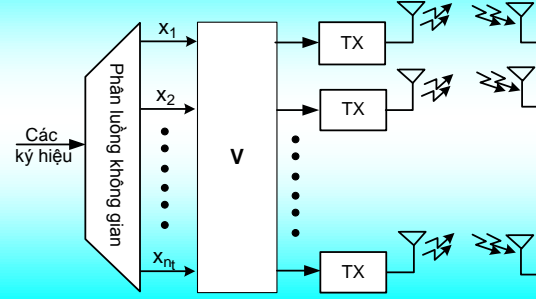
21

www.ptit.edu.vn

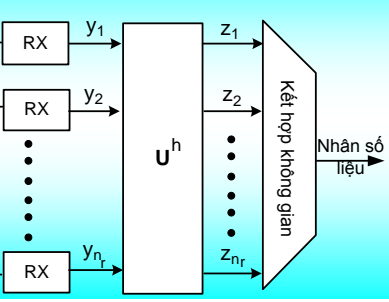
CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Mô hình kênh SVD tối ưu

a) Máy phát SVD MIMO



b) Máy thu SVD MIMO



$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= \mathbf{U}^h (\mathbf{H} \mathbf{x} \mathbf{V} + \boldsymbol{\eta}) \\ &= \mathbf{U}^h \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^h \mathbf{V} \mathbf{x} + \mathbf{U}^h \boldsymbol{\eta} \\ &= \mathbf{D} \mathbf{x} + \mathbf{U}^h \boldsymbol{\eta} \end{aligned}$$

22

22

23

Dung lượng kênh SISO-SIMO-MIMO

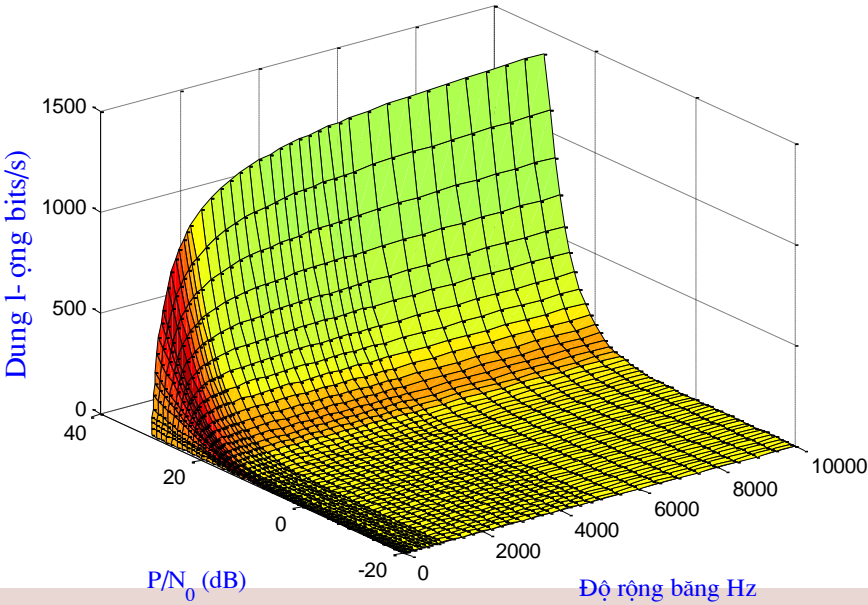
❖ **Dung lượng kênh SISO**

Định lý dung lượng kênh truyền: *Dung lượng kênh có độ rộng băng B (Hz), bị nhiễu loạn bởi tạp âm Gaussian trắng cộng AWGN có mật độ phổ công suất $N_0/2$ và bị giới hạn băng thông B , được cho bởi*

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \quad \text{bits/s}$$

*Trong đó P là công suất **thu** trung bình*

KHẢO SÁT DUNG LƯỢNG KÊNH SISO THEO Ặ RỘNG BĂNG B & SNR



26

❖ Dung lượng kênh SISO

$$C_{\text{SISO}} = \log_2 [1 + \text{SNR}], \quad \text{bit/s/Hz}$$

Do kênh vô tuyến phađinh ngẫu nhiên và thay đổi theo thời gian nên dung lượng kênh có thể được viết là

$$C_{\text{SISO}} = \log_2 [1 + \text{SNR} \cdot |H|^2], \quad \text{bit/s/Hz}$$

H là biên độ kênh Gaussian phức công suất đơn vị kích thước 1×1

27

❖ Dung lượng kênh SIMO

$$C_{\text{SIMO}} = \log_2 [1 + \text{SNR} \cdot (HH^H)], \quad \text{bit/s/Hz}$$

Thấy rõ, dung lượng của kênh **SIMO** được cải thiện so với kênh **SISO**. Việc tăng dung lượng do phân tập không gian làm giảm phađinh và cải thiện SNR. Tuy nhiên cải thiện SNR bị hạn chế vì SNR tăng ở bên trong hàm **log**

28

❖ Dung lượng kênh MIMO: m anten phát và n anten thu

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left\{ \det \left[\mathbf{I}_n + \frac{\text{SNR}}{m} (\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \right] \right\}, \quad \text{bit/s/Hz}$$

Thấy rõ, ưu điểm của hệ thống **MIMO** về dung lượng. Khi $n=m=N$ thì $\mathbf{H}\mathbf{H}^H/N$ tiến đến \mathbf{I}_N vì vậy dung lượng tiệm cận đến

$$C_{\text{MIMO}} \approx N \cdot \log_2 [1 + \text{SNR}], \quad \text{bit/s/Hz}$$

Dung lượng tăng tuyến tính theo số anten phát



www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Dung lượng kênh

$$C = \log \left[\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\text{SNR}}{n_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^h \right) \right], \quad \text{bps / Hz}$$

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}}{n_t} \lambda_1 \right) + \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}}{n_t} \lambda_2 \right) + \dots + \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}}{n_t} \lambda_N \right) \text{bps / Hz}$$

- ❑ Dung lượng MIMO tăng tuyến tính với $\min(n_t, n_r)$ và ma trận kênh phân chia thành $\min(n_t, n_r)$ kênh song song độc lập
- ❑ Dung lượng kênh tăng tuyến tính do tăng hạng của \mathbf{H}

29

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1

29

www.ptit.edu.vn CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

Hiệu năng kênh MIMO

- ❑ Tỷ số tín hiệu trên tạp âm
- ❑ Hiệu suất sử dụng phổ tần

30 Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1 30

www.ptit.edu.vn CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

❖ Hiệu năng MIMO


Hệ thống MIMO $n_t \times n_r$, SNR đầu ra và hiệu suất sử dụng phổ tần được biểu diễn như sau:

$$\text{SNR} = \frac{\frac{P_T}{n_t} \sum_{n=1}^{n_t} \sum_{m=1}^{n_r} |h_{n,m}|^2}{n_r \sigma^2} = \frac{1}{n_t n_r} \frac{P_T}{\sigma^2} \sum_{n=1}^{n_t} \sum_{m=1}^{n_r} |h_{n,m}|^2$$

$$\text{SE} = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{P_T}{n_t \sigma^2} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] \text{ bps / Hz}$$

Trong đó: $N = \min(n_t, n_r)$

31 Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1 31

www.ptit.edu.vn

CƠ SỞ KỸ THUẬT THÔNG TIN VÔ TUYẾN

Bài tập

Cho một hệ thống LTE hai cửa anten ($N_A=2$) sử dụng hai lớp với ma trận tiền mã hóa 2×2 cho ma trận kênh H như sau:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$$

1. Phân tích SVD cho H
2. Tìm hạng của ma trận
3. Tìm ma trận tiền mã hóa.
4. Vẽ sơ đồ kênh MIMO 2×2 với tiền mã hóa

32

Giảng viên: Nguyễn Việt Hưng
Bộ môn: Vô Tuyến – Khoa Viễn Thông 1