

WRITEXS 2023: MATLAB for Wireless Communications



Goki Folder Rudianto Purba, A.Md.T.

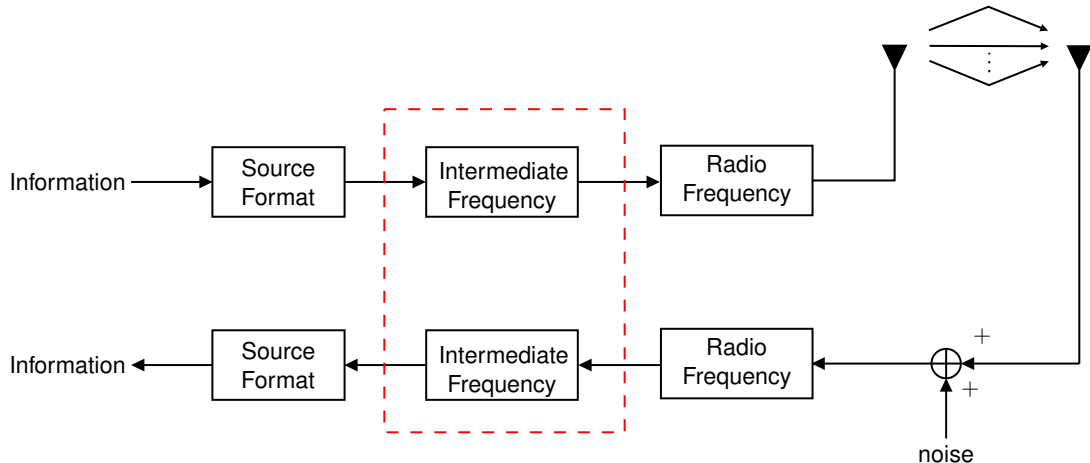
The University Center of Excellence for Advanced Intelligent Communications (AICOMS)
School of Electrical Engineering, Telkom University, Bandung, INDONESIA

Presented at **AICOMS WRITEXS 2023**
Bandung, Juni 2, 2023

Outline

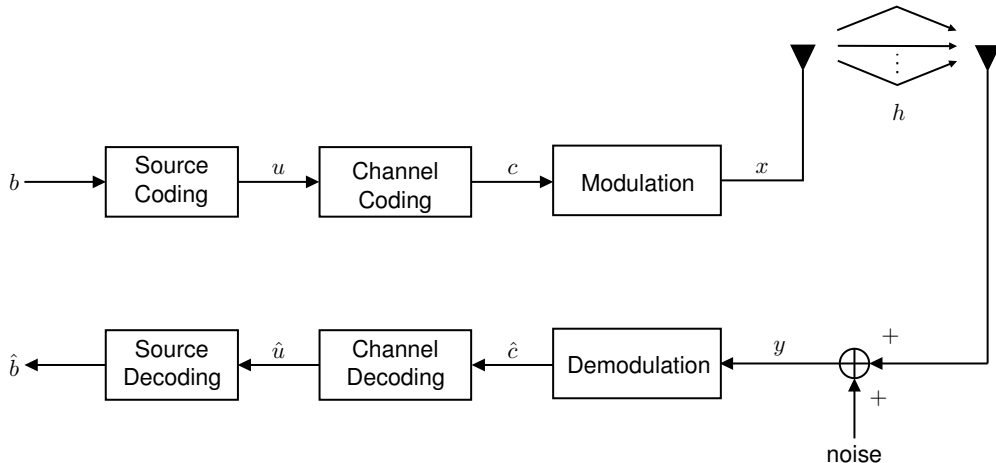
- 1 Struktur Dasar Sistem Komunikasi *Wireless Digital*
- 2 *Modulation*
- 3 *Noise*
- 4 *Equalizer*
- 5 Demapper/Decoder
- 6 *Performance Evaluation*
- 7 Simulasi MATLAB Untuk Sistem Komunikasi *Single* dan *Multi-carrier*
- 8 Multi Antenna

Diagram Blok Sistem Komunikasi *Wireless*



- Blok sistem komunikasi *wireless* secara umum terdiri atas tiga bagian yaitu *Source Format*, *Intermediate Frequency*, dan *Radio Frequency*.

Blok *Intermediate Frequency* (IF)

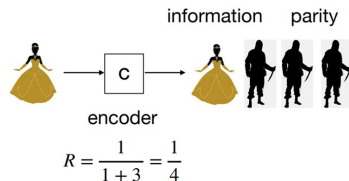


- Pada blok *Intermediate Frequency* (IF), terdapat tiga komponen utama yaitu blok *Source Coding*, blok *Channel Coding*, dan blok *Modulation*.

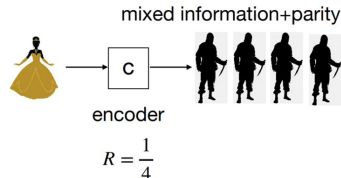
Channel Coding

- *Channel Coding*, dikenal juga sebagai *forward error control coding* (FECC), merupakan suatu proses pendeteksian dan perbaikan bit yang mengalami kesalan pada saat transmisi.
- Proses ini ada sisi pengirim sistem komunikasi digital, bagian channel coding disebut juga sebagai encoder bit redudansi (bit parity) ditambahkan pada informasi yang dikirimkan sebelum proses modulasi untuk difungsikan sebagai proteksi.
- Pada sisi penerima, bagian channel coding yang disebut sebagai decoder melakukan pendeteksian informasi dan melakukan perbaikan jika informasi mengalami kerusakan saat terkena *noise*, interferensi, dan *fading*.

(a) Systematic

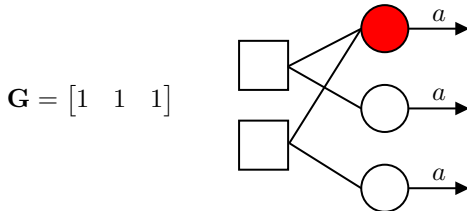


(b) Nonsystematic



Channel Coding: Repetition Codes (1/2)

- *Repetition codes* meng-encode bit informasi u menggunakan
 - ▶ Matriks *generator* (G) pada *transmitter* untuk membuat *codeword* $c = uG$.



Systematic form $G = [I_k P]$

contoh $(3, 1) = (n, k)$

Information bits $k = 1$

parity bits $r = n - k = 3 - 1 = 2$

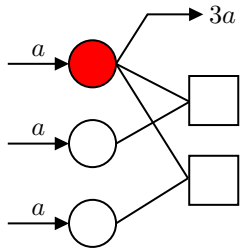
Ide dari *Repetition code* adalah untuk menambah jarak kode dengan mengulang informasi logis beberapa kali.

```
% Copyright AICOMS WRITEX 2023
function codeword = func_repetition_encode(u, R)
    for i=1:length(u)
        for jj = 1:R
            codeword(R*i+1-jj)=u(i);
        end
    end
end
```

Information bits	Parity Bits	codeword
0	00	000
1	11	111

Channel Coding: Repetition Codes (2/2)

- *Repetition codes* men-decode informasi yang diterima menggunakan
 - ▶ Matriks *parity check* (\mathbf{H}) pada *receiver* untuk mengembalikan *codeword* menjadi bit informasi kembali (\hat{u}).



$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

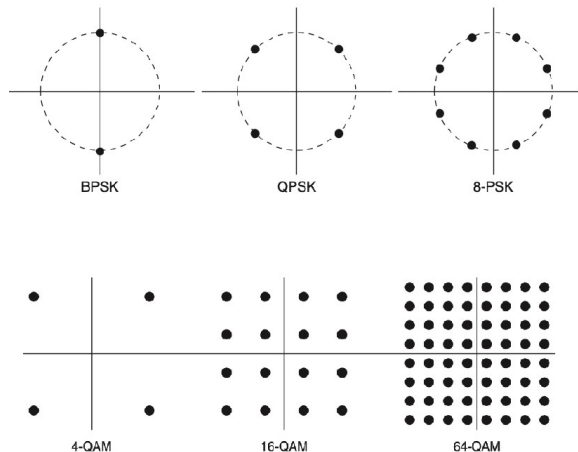
Systematic form $\mathbf{H} = [\mathbf{P}^T \mathbf{I}]$

Mengembalikan informasi yang diterima dengan berdasarkan modulus tertinggi dari code

```
%% Copyright AICOMS WRITEX 2023
function u = func_repetition_decoder(c,R)
    n = length(c)/R;
    u = zeros(1,n);
    for i=1:n
        startIndex = (i-1)*R+1;
        endIndex = i*R;
        u(i) = mode(c(startIndex:endIndex));
    end
end
```

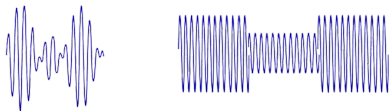
Modulation: Pengenalan

- Modulasi merupakan suatu teknik untuk membentuk gelombang sinyal sehingga mencapai jarak jauh dan tahan terhadap *error*.
- Phase-shift keying (PSK): Fasa dari sinyal pembawa diubah (terbatas).
- Frequency-shift keying (FSK): Frekuensi dari sinyal pembawa diubah (terbatas).
- Amplitude-shift keying (ASK): Amplitude dari sinyal pembawa diubah (terbatas).
- Quadrature amplitude modulation (QAM): Minimal 2 fasa dan 2 amplitudo yang digunakan.

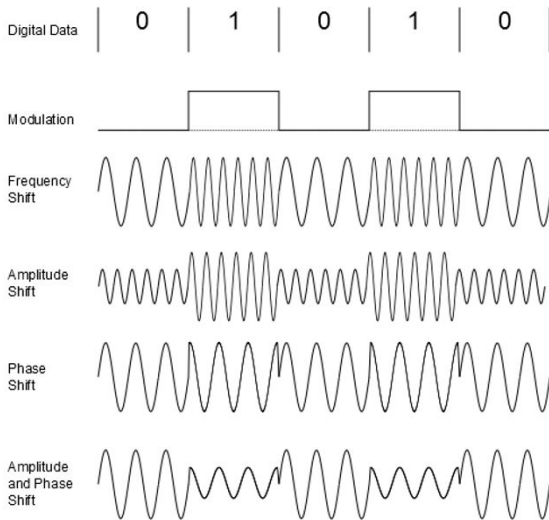
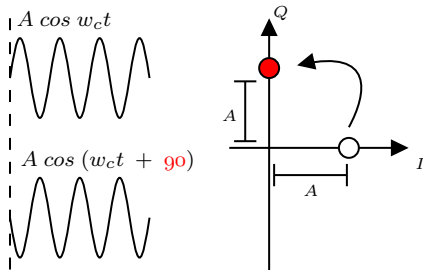


Modulation: Digital Modulation

Digital modulation lebih kuat terhadap noise



karena *noise* biasanya jauh lebih kecil daripada amplitudo pulsa biner



Contoh Mapping Modulasi pada 5G NR

- C-BPSK

Pada modulasi C-BPSK, bit $c(i)$ dipetakan ke dalam simbol kompleks $x(i)$ yaitu

$$x(i) = \frac{1}{\sqrt{2}}[(1 - 2c(i)) + j(1 - 2c(i))]. \quad (1)$$

- QPSK

Pada modulasi QPSK, sepasang bit $c(i)$, $c(i+1)$ dipetakan ke dalam simbol kompleks $x(i)$ yaitu

$$x(i) = \frac{1}{\sqrt{2}}[(1 - 2c(i)) + j(1 - 2c(i+1))]. \quad (2)$$

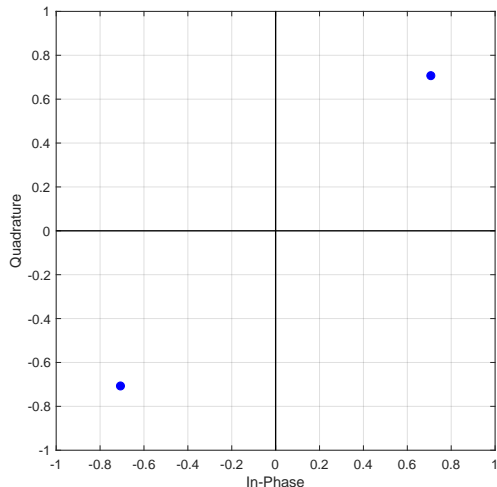
- 16 QAM

Quadruplet bit dipetakan ke simbol kompleks $x(i)$ yaitu

$$x(i) = \frac{1}{\sqrt{10}}[(1 - 2c(4i))[2 - (1 - 2c(4i+2))] + j(1 - 2c(4i+1))[2 - (1 - 2c(4i+3))]]. \quad (3)$$

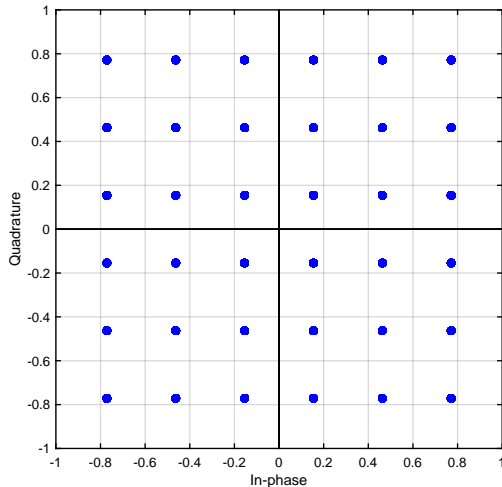
Program MATLAB Untuk *Mapping* Modulasi C-BPSK

```
% Copyright AICOMS WRITEX 2023
clc; clear all;
c=[0:1]; M=log2(2);
for i=1:length(c)
    x(i) =
        (1/sqrt(2))*((1-2*c(i))+sqrt(-1)*(1-2*c(i)));
    %mapping
end
plot(x,'ob','MarkerFaceColor','b'); axis([-1 1 -1
    1]);
for i = 1:length(c)
    text ((real(x(i))-0.03),(imag(x(i))+0.2),...
    mat2str(c(i)),'FontSize', 11); %memposisikan bit
    string
end
grid on;
xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature');
line([0 0], ylim,'lineWidth', 1, 'Color', 'r');
line(xlim, [0 0],'lineWidth', 1, 'Color', 'r');
```



Program MATLAB Untuk *Mapping* Modulasi 64-QAM

```
%% Copyright AICOMS WRITEX 2023
clc; clear all;
M=log2(64);size = 1024*M;
c=randi([0,1],1,size);
addpath(genpath('function'));
[x, code_bit, code_simbol] =
    func_mapper(c,'64qam');
plot(x,'ob','MarkerFaceColor','b'); axis([-1 1 -1
    1]);
grid on;
xlabel('In-phase');
ylabel('Quadrature');
line([0 0], ylim,'lineWidth', 1, 'Color', 'k');
line(xlim, [0 0],'lineWidth', 1, 'Color', 'k');
```



Noise

- *Noise* adalah random signal yang tidak diinginkan karena dapat mendistorsi sinyal pada suatu sistem komunikasi.
- *Noise* biasanya disebabkan oleh suhu panas, rangkaian tidak sempurna, dan beberapa hal lainnya.
- Noise pada pemrograman MATLAB didefinisikan sebagai

$$\text{noise} = \sigma / \text{sqrt}(2) * (\text{randn}(1, N) + \text{sqrt}(-1) * (\text{randn}(1, N))); \quad (4)$$

dengan $j = \sqrt{-1}$, N adalah *blocklength*, dan σ adalah standar deviasi dari *double-sided white noise* yang hubungannya dengan SNR adalah

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{\sigma^2} \approx \frac{E_b}{N_0} \cdot M \cdot R, \quad (5)$$

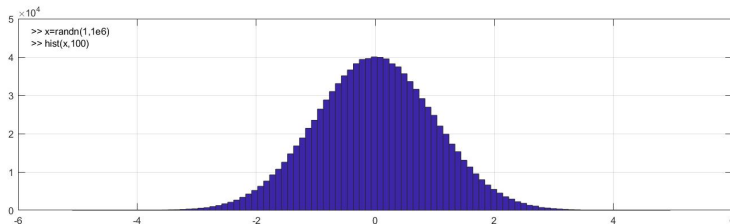
dengan M adalah indeks modulasi, R adalah *channel coding rate*, dan $N \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, $P = \mathbb{E}[x]^2 = 1$.

Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Karakteristik AWGN:

- **Additive**, karena AWGN adalah *noise* yang bersifat "menambahkan diri" pada sinyal di penerima.
- **White**, AWGN adalah *noise* yang bersifat putih yaitu menyerang secara rata pada semua frekuensi (tidak milih-milih frekuensi).
- **Gaussian**, karena nilai *noise*-nya terdistribusi mengikuti *Gaussian distribution*.

AWGN sering digunakan sebagai nama *channel* model, karena untuk AWGN channel yang berpengaruh hanya AWGN saja ($y = hx + n = x + n$). *randn* adalah fungsi di matlab untuk meng-*generate* distribusi normal/distribusi Gaussian.



- *Equalizer* adalah perangkat pada *receiver* yang digunakan untuk mengembalikan sinyal yang mengalami distorsi, translasi, dan rotasi selama perjalanan transmisi.
- Pengembalian sinyal ini bisa dilakukan dengan mengurangi atau menghilangkan *inter-symbol interference* (ISI) dan mengembalikan sinyal yang rusak akibat distorsi kanal.
- **Zero Forcing Equalizer**

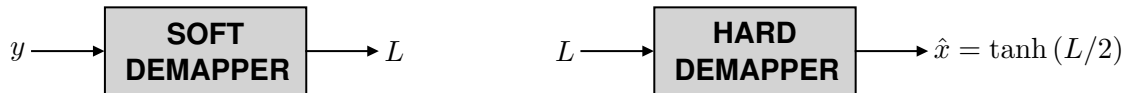
$$w = \hat{h}^{-1}. \quad (6)$$

- **Minimum Mean Squared Error (MMSE)**

$$w = \frac{\hat{h}^*}{\hat{h}^* \hat{h} + \sigma^2}. \quad (7)$$

dengan σ^2 adalah varians noise dan \hat{h}^* adalah *eigenvalue* dari kanal.

Hard vs Soft Demapper



- Proses *demapping* pada *hard demapper* dilakukan dengan menggunakan *threshold* berdasarkan pembagian map area setiap simbol.
- Hal tersebut rentan menimbulkan kerancuan dalam *decision making* untuk menentukan bit 0 dan 1.
- Sedangkan pada *soft demapper* semua probabilitas simbol yang tersedia ikut dipertimbangkan.
- Hal ini menyebabkan ketelitian proses demapping pada soft demapper lebih tinggi.

Soft Demapper

Soft demapper menghasilkan nilai estimasi *Log-Likelihood Ratio* (LLR) dari simbol data y . L_{ch} merepresentasikan nilai LLR yang dipakai untuk menentukan bit yang diterima pada receiver sebagai 0 atau 1.

$$L_{ch}(x|y) = \ln \frac{\exp\left(-\frac{(y-1)^2}{2\sigma^2}\right)}{\exp\left(-\frac{(y+1)^2}{2\sigma^2}\right)} = \frac{2}{\sigma^2} \cdot y. \quad (8)$$

Berdasarkan ¹, Nilai L_{ch} dengan modulasi QPSK dituliskan dengan

$$L_{ch}(c_k|y) = \ln \left(\frac{\sum_{x^{c_k}=0, i=1}^{2^{M-1}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(y - x_{(1,i)})^2\right)}{\sum_{x^{c_k}=1, i=1}^{2^{M-1}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(y - x_{(1,i)})^2\right)} \right), \quad (9)$$

dengan $M = 2$ adalah jumlah bit dalam satu simbol.

¹ S. ten Brink, J. Speidel, and R.-H. Yan, "Iterative Demapping and Decoding for Multilevel Modulation" in IEEE GLOBECOM, Sydney, New South Wales, Australia, November 1998.

Bit Error Rate (BER) Calculation

- Pada sistem komunikasi digital, satuan unit data yang digunakan adalah bit, sehingga, kualitas sistem ini diukur dengan rata-rata nilai bit error rate (BER).
- Bit dikatakan mengalami error saat bit yang dikirim berbeda dengan bit yang diterima.
- BER dapat dinyatakan dengan

$$\text{BER} = \frac{\text{jumlah bit error}}{\text{jumlah bit yang dikirimkan}} \quad (10)$$

Skema Modulasi	AWGN	Single-path Rayleigh Fading
BPSK	$\frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma})$	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\gamma}}} \right)$
QPSK	$\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right)$	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{\gamma}}} \right)$

Simulasi Sistem Komunikasi Pada MATLAB (1/3)

```
%% Copyright AICOMS WRITEX 2023
m = 2;                %index modulation
M = log2(m);          %length bits per symbol
N = 128;              %Length of bits infromation
R = 1;               %Code Rate
K = floor(N*R);       %BlockLength
SNR = 0:5:50;         %[dB] SNR
snr = 10.^(SNR/10);   %SNR dalam numerik
frame = 5000;
for i=1:length(SNR)
    fprintf('SNR: %d\n', SNR(i));
    ber = 0;
    sigma = sqrt(1/snr(i)); %Variance
    for j = 1:frame
        %% Transmitter
        u = randi([0,1],1,N); %Generate random bits
        out_simbol = 1-2.*u; %BPSK Modulation
        x = out_simbol; %Tx
        %% Channel
        noise = sigma/sqrt(2)*(randn(1,N)+(sqrt(-1)*randn(1,N))); %AWGN
        %h = 1; %AWGN Channel
    end
end
```

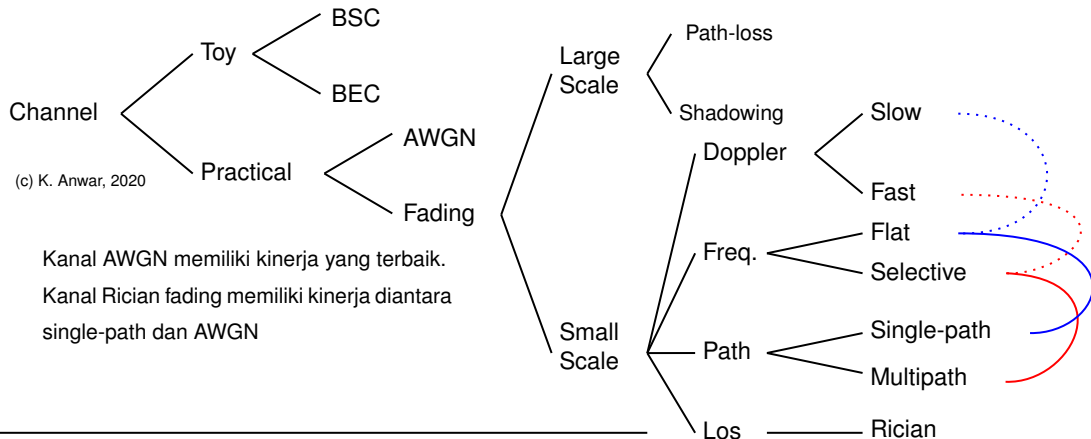
Simulasi Sistem Komunikasi Pada MATLAB (2/3)

```
h = (randn+sqrt(-1)*randn)/sqrt(2); %Rayleigh Fading Channel
%% Receiver
y = h*x+noise; %Received signal
yeq = conj(h)*y;
for k=1:length(y)
    if yeq(k)>=0
        u_hat(k)=0;
    else
        u_hat(k)=1;
    end
end
compare_bit = sum(u_hat~=u); %Compare Bit
ber = ber+compare_bit;
end
%% Get average of BER
BER(i) = ber/(frame*K);
end
```

Simulasi Sistem Komunikasi Pada MATLAB (3/3)

```
fprintf('BER: %d\n', BER);  
figure(1);  
Figure1 = figure(1);  
semilogy(SNR, BER, '--bo', 'linewidth', 1);  
xlabel('Average SNR (dB)');  
ylabel('Average BER');  
legend('Uncoded')  
grid on;  
FigW = 6;  
FigH = 5.6;  
set(Figure1,'defaulttextinterpreter','tex',...  
    'PaperUnits','inches','Papersize',[FigW,FigH],...  
    'Paperposition',[0,0,FigW,FigH],'Units','Inches',...  
    'Position',[0,0,FigW,FigH])  
set(gca,...  
    'FontSize',10,...  
    'FontName','Arial');  
hold on;
```

Kanal Model *Review Model*



Slow, Frequency-flat, dan single-path fading channel memiliki kinerja yang hampir sama.

Fast (asumsikan bahwa channel estimation sempurna), frequency-selective, dan multipath fading channel memiliki kinerja yang hampir sama dan kinerja lebih baik.

Kanal Model *Multipath* dan Pengenalan ISI

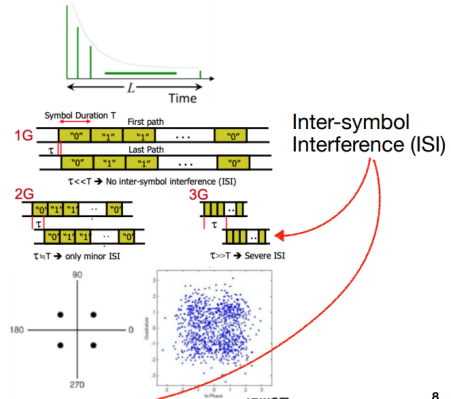
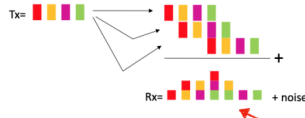
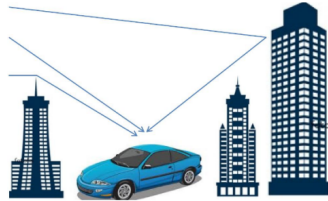
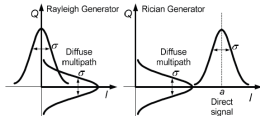
Radio kanal dapat dimodelkan sebagai *linear filter* dan dapat dikarakteristikan oleh *impulse response* dalam domain waktu.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau + n(\tau), \quad (11)$$

dengan $n(t)$ adalah AWGN noise. Proses konvolusi diberikan oleh integral konvolusi

$$h(t) = \sum_{k=0}^{L-1} a_k e^{j\theta_k} \delta(t - \tau_k), \quad (12)$$

dengan τ adalah *propagation delay*.



Dalam simulasi pada umumnya radio kanal dimodelkan dalam bentuk (Rayleigh) *statistical distribution*,

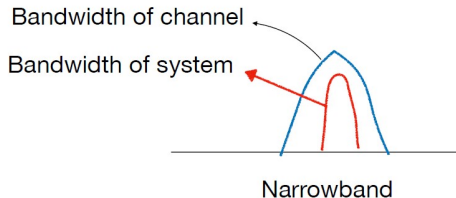
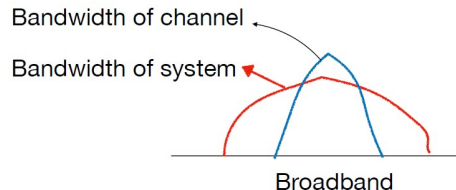
In MATLAB environment $h = (\text{randn} + \text{sqrt}(-1) * \text{randn}) / \text{sqrt}(2)$

Kanal *Broadband* (1/3)

- Sistem *broadband*, seperti 3G, 4G, dan 5G memiliki kanal yang sangat lebar, sehingga kapasitasnya lebih besar daripada kanal *narrowband* yang dihitung menurut teori Shannon dengan

$$C \approx \frac{B}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + (|\psi_n|^2 \cdot \gamma)) \quad (13)$$

- Pada kanal *broadband*, terdapat lebih dari satu path yang diindikasikan melalui nilai *Eigen* dari kanal (ψ_n) untuk $n = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ dengan B adalah *bandwidth* kanal, N adalah panjang blok transmisi, dan γ adalah *signal-to-noise power ratio* (SNR).



Kanal *Broadband* (2/3)

- Hubungan SNR dengan E_b/N_0 didefinisikan dengan

$$\gamma = \frac{E_b}{N_o} \cdot M \cdot R \cdot \frac{N}{N + Q}, \quad (14)$$

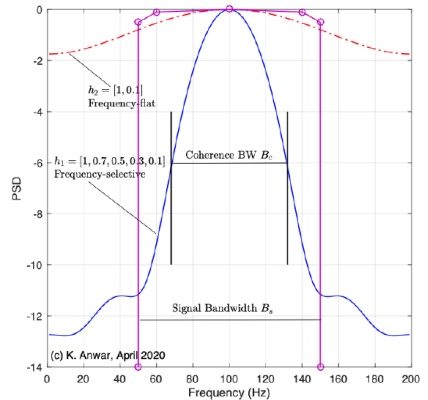
dengan M adalah indeks modulasi yang memuat jumlah bit per simbol, R adalah *channel coding rate*, dan Q adalah panjang *cyclic prefix*.

- Nilai untuk setiap kanal paralel ekuivalen yang diperoleh dari *power delay profile* (PDP) dinyatakan dengan

$$\hat{h} = \text{diag}[\mathbf{F} \cdot \mathbf{H}_c \cdot \mathbf{F}^H], \quad (15)$$

dengan \mathbf{H}_c adalah matriks *Circulant* yang merupakan hasil penambahan *cyclic prefix* (CP), \mathbf{F} adalah matriks *Fast Fourier Transform* (FFT), dan \mathbf{F}^H adalah matriks *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT).

- Broadband memiliki kinerja lebih baik karena setiap simbol mengalami kanal yang berbeda



- Narrowband mengalami kanal yang hampir atau sama dalam setiap simbol.

Kanal Broadband (3/3)

```
% Copyright AICOMS WRITEX 2023
clc;clear all;path=[1 0.011686918 0.077624712 0.000246207 4.93515E-06]; %Broadband
%path=[1]; %narrowband
path_len=length(path); %jumlah/panjang path
for m=1:path_len
    h(m)=sqrt(path(m))*(randn+sqrt(-1)*randn)/sqrt(2); %arriving power of m-path
end
m = 2;M = log2(m); R = 1; %indeks modulasi yang digunakan %coding rate
FFTSIZE = 64; %ukuran FFT
K = FFTSIZE*M; %jumlah bit
N = R*K; %panjang blok
Q = ceil((1.17/16.67)*FFTSIZE) ; %panjang CP dengan Numerology 4
EBN = 0:5:50 ; %nilai Eb/NO dalam dB
ebn = 10.^(EBN/10) ; %nilai Eb/NO dalam numerik
snr = ebn*M*R*(FFTSIZE/(FFTSIZE+Q)); %nilai SNR pada kanal Broadband
F = dftmtx(FFTSIZE)/sqrt(FFTSIZE); %matriks FFT
Fh = F'; %matriks IFFT
Heq=circulant([h zeros(1,FFTSIZE-length(h))]); %[64x64] Circulant Matrix (c) Khoirul Anwar
psi = F*Heq*Fh; %[64x64]
psi_vall = diag(psi)
```

Sistem Komunikasi *Multi-carrier*

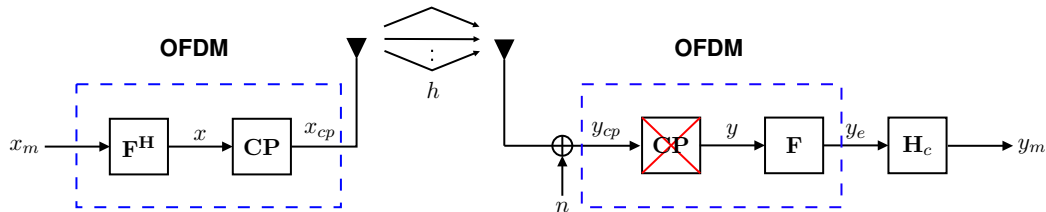


Figure: Struktur blok *transmitter* dan *receiver* pada sistem komunikasi *multi-carrier* (CP-OFDM).

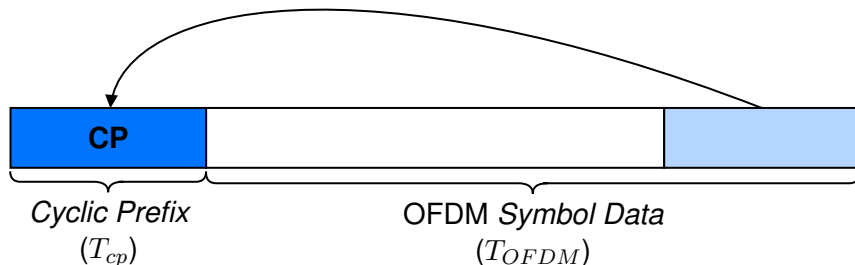
- *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* atau OFDM adalah skema untuk mengirimkan banyak informasi melalui beberapa subkanal (*multiplexing*) dengan alokasi frekuensi tertentu yang sederhana untuk mendapatkan transmisi data berkecepatan tinggi melalui kanal *multipath fading*.
- OFDM mampu menghilangkan gangguan *inter-symbol interference* (ISI) dan *inter-carrier interference* (ICI) melalui penggunaan *cyclic prefix* (CP).

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) (1/3)

- 5G-New Radio (5G-NR) memiliki perbedaan yang mendasar dibandingkan 4G-LTE. 5G-NR mendukung berbagai jenis jarak subcarrier (*subcarrier spacing*) pada gelombang sinyal OFDM.
- Tipe OFDM *Numerology* pada 5G-NR dapat ditunjukkan pada tabel berikut.

Parameter / Numerology (μ)	0	1	2	3	4
Subcarrier Spacing (KHz)	15	30	60	120	240
OFDM Sym. Duration (μ s)	66.6	33.3	16.67	8.33	4.17
CP Duration (μ s)	4.69	2.3	1.17	0.57	0.29
OFDM Sym. incl. CP (μ s)	71.3	35.6	17.8	8.92	4.46
Bandwidth min. (MHz)	4.32	8.64	17.2	34.5	69.1
Bandwidth max. (MHz)	49.5	99	198	396	397.4

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) (2/3)



- Berdasarkan ketentuan OFDM *Numerology*, maka panjang CP (Q) dapat didefinisikan dengan

$$Q = \frac{T_{cp}(i)}{T_{OFDM}(i)} \cdot N, \quad (16)$$

dengan T_{cp} menunjukkan durasi *cyclic prefix* dan T_{OFDM} durasi simbol OFDM pada *Numerology* ke- i .

Matriks Toeplitz dan Circulant (1/4)

- Sinyal yang diterima (y) pada sisi *receiver* dapat dinyatakan dengan

$$y = \mathbf{H} \cdot x + n; \quad (17)$$

dengan n adalah *noise vector*, x adalah sinyal data yang dikirim, dan \mathbf{H} adalah matriks Toeplitz yang berisi nilai PDP dari kanal.

- Operasi perkalian kanal (\mathbf{H}) dengan sinyal data (x) mengikuti operasi konvolusi.

Matriks Toeplitz dan Circulant (2/4)

- Jika nilai PDP seperti $h = [h0; h1]$ dan data yang ditransmisikan (x) ditambah dengan CP sepanjang $Q = 2$, yaitu $x_Q = [d, e, a, b, c, d, e]$, maka sinyal yang diterima pada sisi *receiver* dapat dinyatakan menurut

$$y = \begin{bmatrix} h0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h1 & h0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h1 & h0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h1 & h0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h1 & h0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h1 & h0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h1 & h0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Matriks Toeplitz dan Circulant (3/4)

- Ukuran matriks Toeplitz \mathbf{H} ditentukan dari $N + Q * 2$ untuk baris dan $Q + N$ untuk kolom, atau dituliskan dengan $\mathbf{H}_{[(N+Q*2) \times (Q+N)]}$
- Pada sisi *receiver*, CP akan dihapus sehingga hasil sinyal yang diterima (y) dapat dinyatakan menurut

$$y = \begin{bmatrix} h_1 e + h_0 a \\ h_1 a + h_0 b \\ h_1 b + h_0 c \\ h_1 c + h_0 d \\ h_1 d + h_0 e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Matriks Toeplitz dan Circulant (4/4)

- Untuk analisis matematis, y juga dapat dihasilkan langsung dari perkalian matriks Circulant (\mathbf{H}_c) dengan x tanpa CP, yaitu

$$y = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & h_1 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

- Jadi matriks Circulant adalah matriks yang ekuivalen dengan matriks hasil transmisi menggunakan CP.

Simulasi Sistem Komunikasi Multi-carrier Pada MATLAB (1/5)

```
%% Copyright AICOMS WRITEX 2023
clc;clear all;addpath(genpath('function'));
%% MODULASI BPSK
m = 2; M = log2(m);R=1;           %index modulation %length bits per symbol %Channel coding rate
FFTSIZE = 64;                     %FFTSIZE
N = FFTSIZE*M;                   %Length of bits in a block 64 item sizes OFDM
K = R*N;                          %Length of bits in each frame
cp = ceil(4.69/66.67*FFTSIZE);    %length of cyclic prefix based on Numerology 0
SNR = 0:5:50;                    %[dB] SNR
snr = 10.^(SNR/10);              %SNR in numeric
ebn0 = snr*1/(M*R)*((N+cp)/N);   %Calculate ebn0
F = dftmtx(FFTSIZE)/sqrt(FFTSIZE); %FFT Matrix
F_h = F';                       %IFFT Matrix
Kk = floor(K);                   %Panjang bit
frame = 500;                     %Frame Iteration
prow = FFTSIZE+cp*2;             %row length matriks Toeplitz
pcol = cp+FFTSIZE;               %col length matriks Toeplitz
S = 0.1;                         %Threshold S for Softdemapper copyright Lia Suci
```

Simulasi Sistem Komunikasi Multi-carrier Pada MATLAB (2/5)

```
for ii=1:length(SNR)
    fprintf('SNR: %d\n', SNR(ii));
    ber = 0;fer = 0;
    sigma = sqrt(1/(snr(ii)));
    BER_bpsk_fading(ii)=0.5*(1-(1/(sqrt(1+(1/(ebn0(ii))))))); %Theory inputnya ebno
    for j=1:frame
        %% Generate bit
        u = randi([0,1],1,N);
        %% Mapper
        [out_simbol, code_bit, code_simbol] = func_mapper(u,'bpsk');
        s = out_simbol; %output symbols of modulation
        %% OFDM Mod
        out_ifft_x1 = ifft(s,FFTSIZE)*sqrt(FFTSIZE); %implementation of IFFT symbol
        out_ifft_x1_cp = [out_ifft_x1(end-cp+1:end), out_ifft_x1]; %add cyclic prefix
        %% Symbol separated by time
        x_all = out_ifft_x1_cp; % tx signal
        %% Channel
        %h = ones(2); %awgn h=[h11 h12;h21 h22] %Model for AWGN channel
        h11 = (randn(1,1)+sqrt(-1)*randn(1,1))/sqrt(2);
        h12 = (randn(1,1)+sqrt(-1)*randn(1,1))/sqrt(2);
        h13 = (randn(1,1)+sqrt(-1)*randn(1,1))/sqrt(2);%only single path
        H = [h11];
```

Simulasi Sistem Komunikasi Multi-carrier Pada MATLAB (3/5)

```
H_Toeplitz = zeros(prow-1,pcol); %prow = FFTSize+cp*2; pcol = cp+FFTSize;
for k = 1:pcol
    for l = 1:length(H)
        H_Toeplitz(l+k-1,k) = H(l); %assign matrix Toeplitz (validate with imagesc(abs(H_Toepl))
    end
end
%% Received Signal
y_t1 = H_Toeplitz*x_all.'; %transmitted through channel
%y_t1 = conv(H,x_all);
n = sigma/sqrt(2)*(randn(size(y_t1))+sqrt(-1)*randn(size(y_t1))); %
y_t1_n_cp = y_t1+n; %received signal and plus noise
%% remove CP and OFDM Demod
y_all = [y_t1_n_cp(cp+1:end-cp+1,1)].'; %remove CP
y = [(fft(y_all(1,:),FFTSize))/sqrt(FFTSize)]; %Implementation of FFT in signal using toeplitz
% y_all = [y_t1_n_cp(1,cp+1:end-1)]; %remove CP
% y = [(fft(y_all(1,:),FFTSize))/sqrt(FFTSize)]; %Implementation of FFT in signal using conv
%% get H Circular
H_c = func_circulant([H zeros(1,FFTSize - length(H))]); % Circulant Matrix (KH0)
Xi = F*H_c*F_h;
Xi = diag(Xi); % get matrix diagonal channel from matrix circulant (H_x)
```

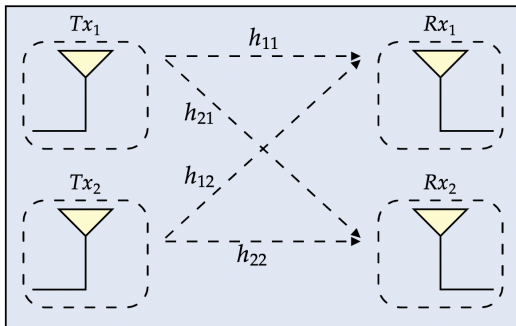
Simulasi Sistem Komunikasi Multi-carrier Pada MATLAB (4/5)

```
%% Equalizer
%eq_mmse = conj(Xi)./((conj(Xi).*Xi)+(sigma^2)); %MMSE
%sHat = eq_mmse.*y.'; %MMSE
eq_zf = 1./Xi; %ZF
sHat = eq_zf.*y.'; %Symbol hat
%[Lci, isi_0, isi_1,Z,Y] = func_Soft_Demapper_S(sHat, code_bit, code_simbol,sigma, S, M);
Lci = sHat.*(2/sigma^2);
%% Demapper BPSK
for k=1:length(sHat)
    if Lci(k) > 0
        bit_de(k)=0;
    else
        bit_de(k)=1;
    end
end
%% BER & FER Calculations
compare_bit = sum(bit_de~=u);
ber = ber+compare_bit;
if compare_bit~=0
    fer = fer+1;
end
end
%% Get average of BER
```

Simulasi Sistem Komunikasi Multi-carrier Pada MATLAB (5/5)

```
disp(ber);
disp(frame*K);
BER(ii) = ber/(frame*K);
FER(ii) = fer/frame;
end
%% Setting Figure
fprintf('BER: %d\n', BER);
fprintf('FER: %d\n', FER);
figure(1);
Figure1 = figure(1);
semilogy(SNR,BPSK_fading,'-k','linewidth',1)
hold on
semilogy(SNR, BER, '--ro', 'linewidth', 1);
xlabel('Average SNR (dB)');
ylabel('Average BER');
legend('BPSK Theory', 'SISO OFDM')
grid on;
```

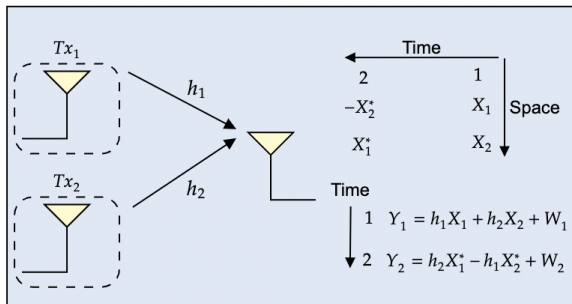
MIMO Communication: Basic Concept (1/5)



$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r1} & h_{r2} & \dots & h_{rt} \end{bmatrix}$$

- MIMO menyediakan kapasitas yang lebih besar (*diversity gain and multiplexing gain*).
- Diversity gain
 - ▶ Receiver Diversity (menggabungkan sinyal yang diterima oleh beberapa antenna misalnya, Selection Combining, Maximum Ratio combining)
 - ▶ Transmit Diversity (Mengirimkan versi redundan dari sinyal yang sama (symbol), selama beberapa *time slot*, dan melalui multiple antennas. e.g. STBC)
- Multiplexing gain
 - ▶ Dari *multiple independent links* (pada pita spektrum yang sama) antara TX dan RX, dan mengirim data secara paralel melaluinya.

MIMO STBC Alamouti Code: 2 Tx and 1 Rx (2/5)



Alamouti Code

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

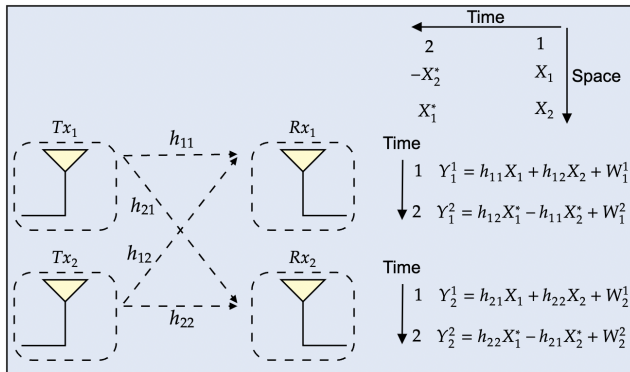
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{Y} \quad (23)$$

• Dekoder sekarang dapat memisahkan simbol data masukan dengan bantuan CSI:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (||h_1||^2 + ||h_2||^2)X_1 \\ (||h_1||^2 + ||h_2||^2)X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W'_1 \\ W'_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

MIMO STBC Alamouti Code: 2 Tx and 2 Rx (3/5)



- STBC dengan 2 pemancar dan 2 penerima.
- Demikian pula untuk dua Pemancar dan dua penerima, relasi input-output dari sistem yang menggunakan Alamouti.
- Matriks dari antenna 1 dan 2 didefinisikan dengan

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} Y_1^1 \\ Y_1^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} Y_2^1 \\ Y_2^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{21} & h_{22} \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

MIMO STBC Alamouti Code: 2 Tx and 2 Rx (cont'd) (4/5)

- Dari persamaan (25) dan (26) untuk antena 1 dan 2 maka kita juga dapat menuliskan \mathbf{Y} dengan

$$\begin{bmatrix} Y_1^1 \\ Y_2^1 \\ Y_1^{2*} \\ Y_2^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1^1 \\ W_2^1 \\ W_1^{2*} \\ W_2^{2*} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \quad (27)$$

- Untuk mengembalikan informasi X_1 dan X_2 , kalikan vector $\mathbf{Y} = [Y_1^1, Y_2^1, Y_1^{2*}, Y_2^{2*}]^T$ dengan \mathbf{H}^H .

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^H \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1^1 \\ W_2^1 \\ W_1^{2*} \\ W_2^{2*} \end{bmatrix} \quad (28)$$

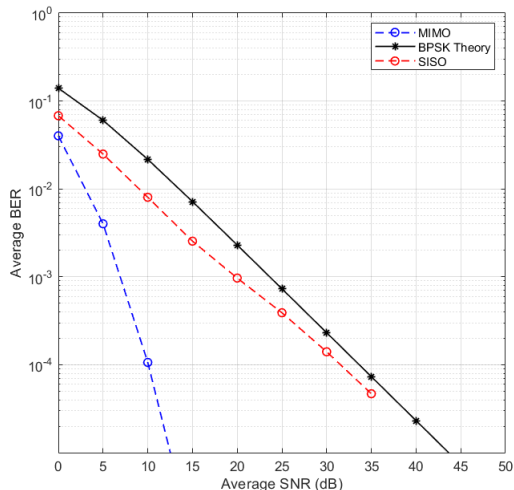
MIMO STBC Alamouti Code: 2 Tx and 2 Rx (cont'd) (5/5)

- Dari persamaan (28) kita bisa menuliskan vektor \mathbf{R} dengan

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{12} \\ h_{12}^* & -h_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1^1 \\ Y_1^{2*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{21}^* & h_{22} \\ h_{22}^* & -h_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_2^1 \\ Y_2^{2*} \end{bmatrix} \quad (29)$$

- Dari persamaan (29) kita lakukan substitusi matematika sederhana dan informasi \hat{X}_1 dan \hat{X}_2 dengan mudah dapat dikembalikan

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\|h_{11}\|^2 + \|h_{12}\|^2 + \|h_{21}\|^2 + \|h_{22}\|^2)X_1 \\ (\|h_{11}\|^2 + \|h_{12}\|^2 + \|h_{21}\|^2 + \|h_{22}\|^2)X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}$$



”Terima Kasih :).”

- AICOMS WIRTEXS 2023 -