

TTI3A3 Sistem Komunikasi 1

Pokok Bahasan:

Transmisi Digital Passband

Dosen: Dr. Suhartono Tjondronegoro

2021

Rencana Pembelajaran Semester

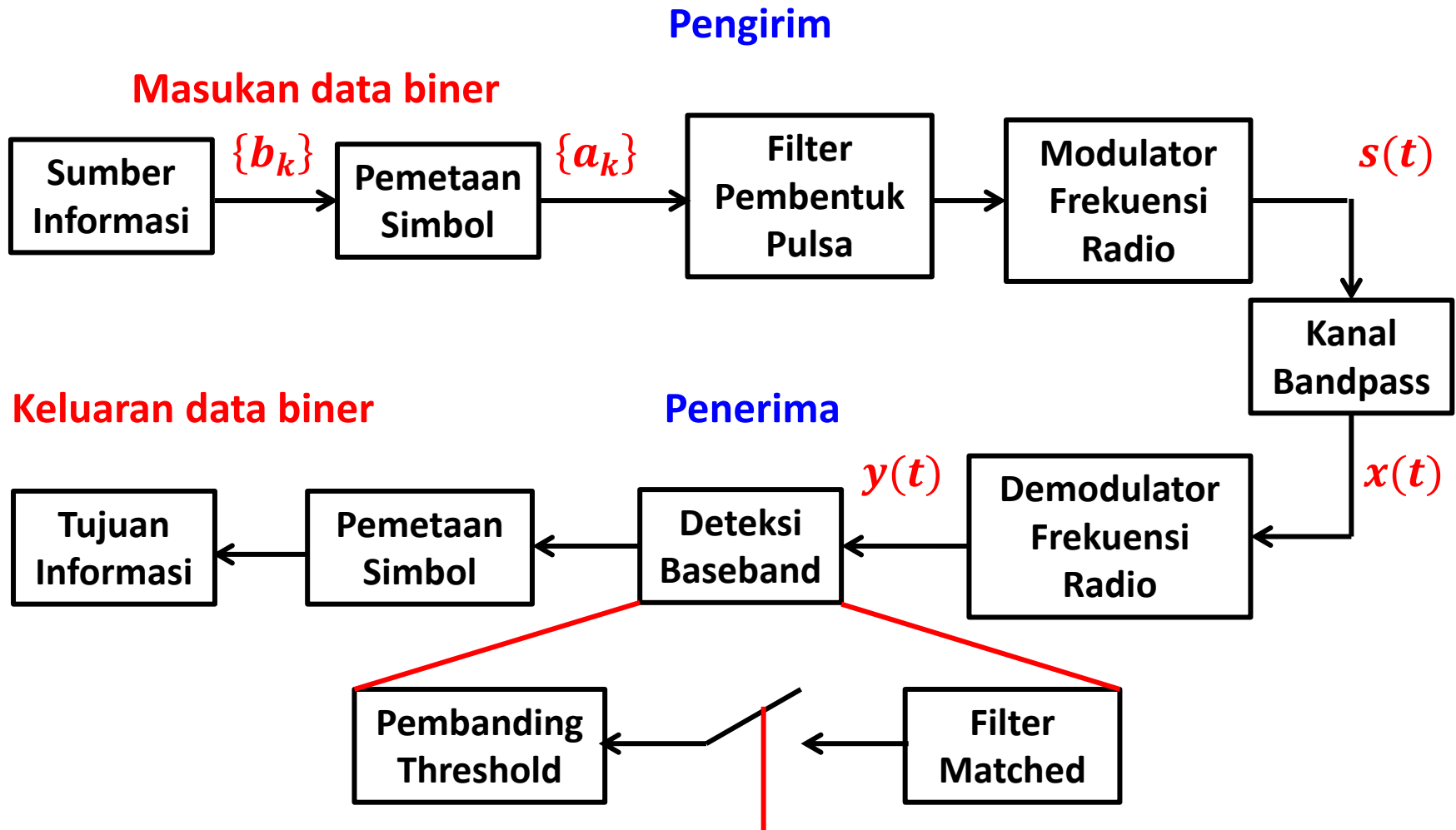
	Materi Pembelajaran	Capaian Pembelajaran
Minggu ke 10 dan 11. PLO 5. CLO 3. Sub-CLO 11.	<ol style="list-style-type: none">1. Sinyal baseband digital: pengertian, unipolar, bipolar, RZ, NRZ, AMI, HDB3.2. Pengenalan modulasi digital: ASK, FSK, PSK, QAM.3. Modulasi M-level, bit-rate, simbol rate, bandwidth.	<ol style="list-style-type: none">1. Memahami modulasi digital baseband dan passband serta perbedaannya.2. Mengenal beberapa contoh modulasi baseband.3. Mengetahui jenis-jenis modulasi passband dan sifat-sifatnya.4. Memahami arti level modulasi dan pengaruhnya terhadap bandwidth.

Transmisi Digital Passband

1. Pendahuluan
2. Pengenalan modulasi digital:
 - 2.1. Amplitude Shift Keying (ASK)
 - 2.2. Frequency Shift Keying (FSK)
 - 2.3. Phase Shift Keying (PSK)
 - 2.4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK)
3. Pengenalan modulasi M-ary
 - 3.1. Pengenalan Skema Modulasi Digital M-ary
 - 3.2. M-ary Phase Shift Keying
 - 3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation.
 - 3.4. M-ary Frequency Shift Keying.
 - 3.5. M-ary Amplitude Shift Keying.

1. Pendahuluan (1)

- Diagram blok transmisi digital passband:



1. Pendahuluan (2)

- Akan dibahas transmisi informasi digital melalui **kanal bandpass**.
- Contoh kanal bandpass:
 - Kanal wireless
 - Kanal satelit
- Dalam hal ini, modulator akan memakai gelombang pembawa sinusoidal, dimana amplituda, fasa, atau frekuensinya akan dirubah sesuai dengan informasi digital.
- **Persamaan gelombang pembawa:**
$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_c)$$
- Dimana A_c adalah amplituda gelombang pembawa, f_c adalah frekuensi gelombang pembawa, dan ϕ_c adalah fasa gelombang pembawa.

1. Pendahuluan (3)

- **3 bentuk dasar modulasi biner yang berbeda:**
 1. Binary amplitude shift-keying (BASK)
 2. Binary phase-shift keying (BPSK)
 3. Binary frequency-shift keying (BFSK)
- Dengan asumsi bahwa gelombang pembawa $c(t)$ mempunyai energi satu selama durasi 1 simbol (bit), maka amplituda gelombang pembawa:

$$A_c = \sqrt{\frac{2}{T_b}}$$

- T_b adalah durasi bit.

1. Pendahuluan (4)

- Bentuk ekuivalen persamaan gelombang pembawa:

$$c(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \phi_c)$$

- **Transmisi band-pass:**

- Untuk skema modulasi linier, sinyal termodulasi dinyatakan dengan persamaan:

$$s(t) = b(t)c(t)$$

- $b(t)$ adalah sinyal biner yang masuk kemodulator.

$$s(t) = b(t)c(t) = b(t) \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \phi_c)$$

- Dengan asumsi: $f_c \gg W$, dimana W adalah bandwidth

1. Pendahuluan (5)

- Energi sinyal per bit yang ditransmisikan:

$$E_b = \int_0^T |s(t)|^2 dt = \frac{2}{T_b} \int_0^{T_b} |b(t)|^2 \cos^2(2\pi f_c t) dt$$

$$E_b = \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |b(t)|^2 dt + \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |b(t)|^2 \cos(4\pi f_c t) dt$$

- Asumsi sinyal bandpass: $|b(t)|^2$ konstan selama satu siklus gelombang sinusoidal $\cos(4\pi f_c t)$, berarti:

$$\int_0^{T_b} |b(t)|^2 \cos(4\pi f_c t) dt = 0$$

- Sehingga diperoleh pendekatan untuk modulasi linier:

$$E_b \approx \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} |b(t)|^2 dt$$

2. Materi bagian pertama

- **Pengenalan modulasi digital:**
 1. Amplitude Shift Keying (ASK)
 2. Frequency Shift Keying (FSK)
 3. Phase Shift Keying (PSK)
 4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK)

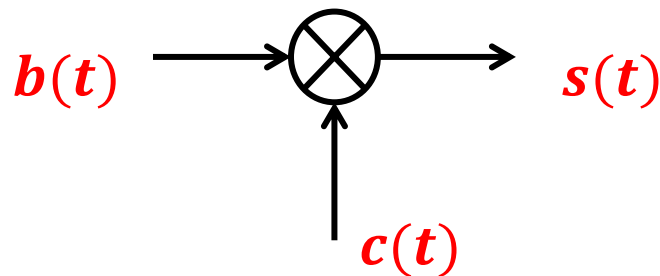
2.1. Amplitude Shift Keying (ASK) (1)

- **Binary amplitude shift keying (BASK)** adalah salah satu bentuk paling awal modulasi digital yang dipakai di telegraphy radio pada awal abad ke 20, sebelum ada sistem komunikasi analog.
- Perhatikan aliran data biner $b(t)$ dengan sifat on-off (unipolar):

$$b(t) = \begin{cases} \sqrt{E_b}, & \text{untuk simbol biner 1} \\ 0, & \text{untuk simbol biner 0} \end{cases}$$

- Aliran data biner $b(t)$ dikalikan dengan gelombang pembawa sinusoidal:

$$c(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$



2.1. Amplitude Shift Keying (ASK) (2)

- Persamaan sinyal BASK, juga disebut sebagai **amplitude shift keying (ASK)**, atau **on off keying (OOK)**:

$$s(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), & \text{untuk simbol 1} \\ 0, & \text{untuk simbol 0} \end{cases}$$

- Bandwidth sinyal amplitude shift keying (ASK), atau on off keying (OOK):**
- Dari simulasi power spectral density, dengan memakai **pulsa segiempat**, maka **bandwidth nol-ke-nol** sinyal OOK adalah:

$$B_T = 2R = \frac{2}{T_b} \text{ hertz}, \quad \text{dimana } R = \frac{1}{T_b} \text{ adalah rate bit}$$

- Bandwidth absolut:

$$B_T = \infty \text{ hertz}$$

2.1. Amplitude Shift Keying (ASK) (3)

- Apabila memakai **pulsa raised cosine**, maka **bandwidth baseband** absolut:

$$B = \frac{1}{2}(1 + \alpha)R,$$

dimana α adalah faktor rolloff pulsa raised cosine

- Maka **bandwidth transmisi** absolut sinyal OOK dengan pulsa raise cosine:

$$B_T = 2B = 2 \left[\frac{1}{2}(1 + \alpha)R \right] = (1 + \alpha)R \text{ hertz}$$

2.1. Amplitude Shift Keying (ASK) (4)

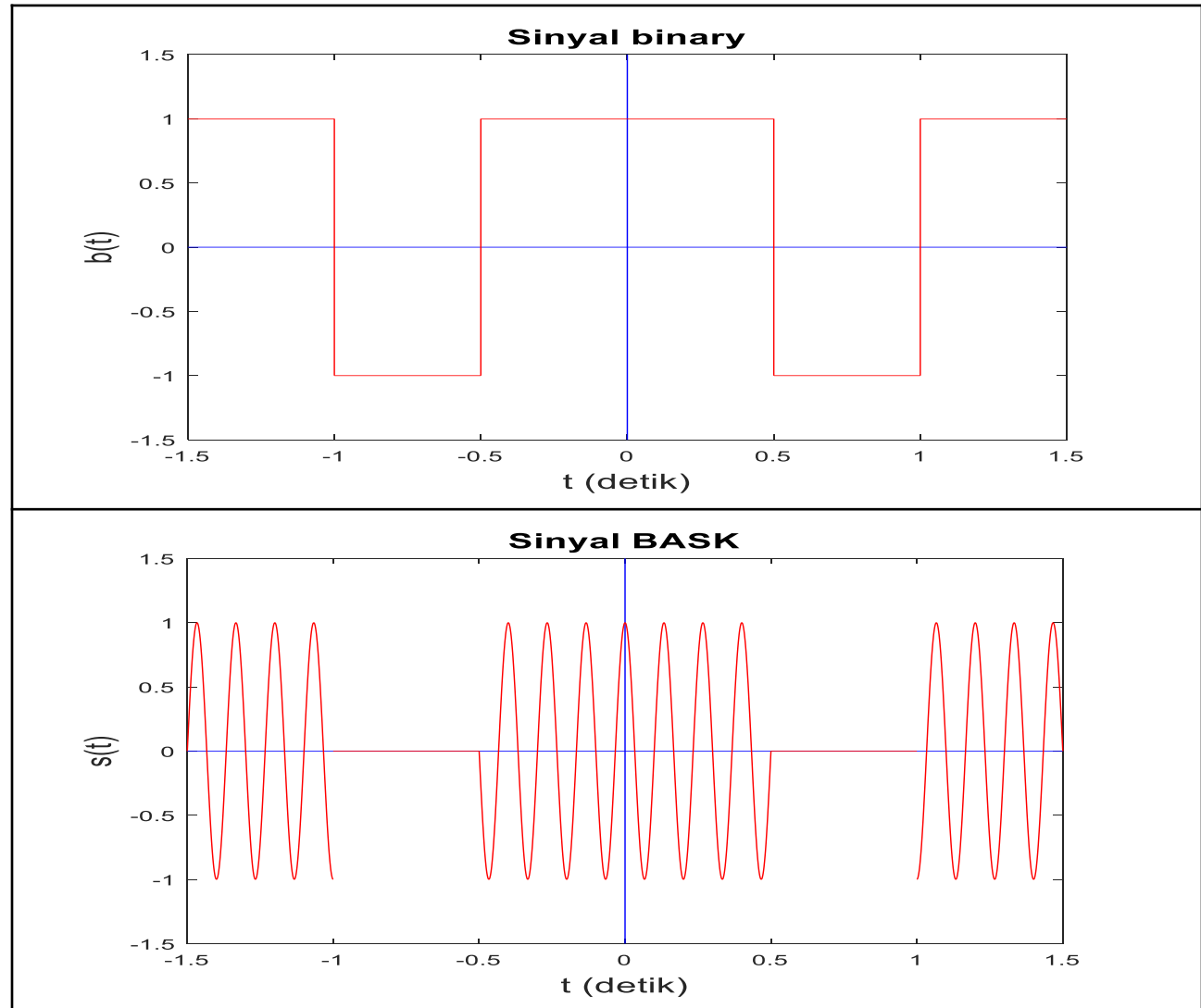
- Bentuk gelombang:

$$T = 0,5 \text{ det}$$

$$R = \frac{1}{T} = 2 \text{ bps}$$

- Dipakai:

$$f_c = 7,5 \text{ Hz}$$



2.2. Frequency Shift Keying (FSK) (1)

- Bentuk paling sederhana Frequency Shift Keying adalah Binary Frequency Shift Keying (BFSK), dengan persamaan:

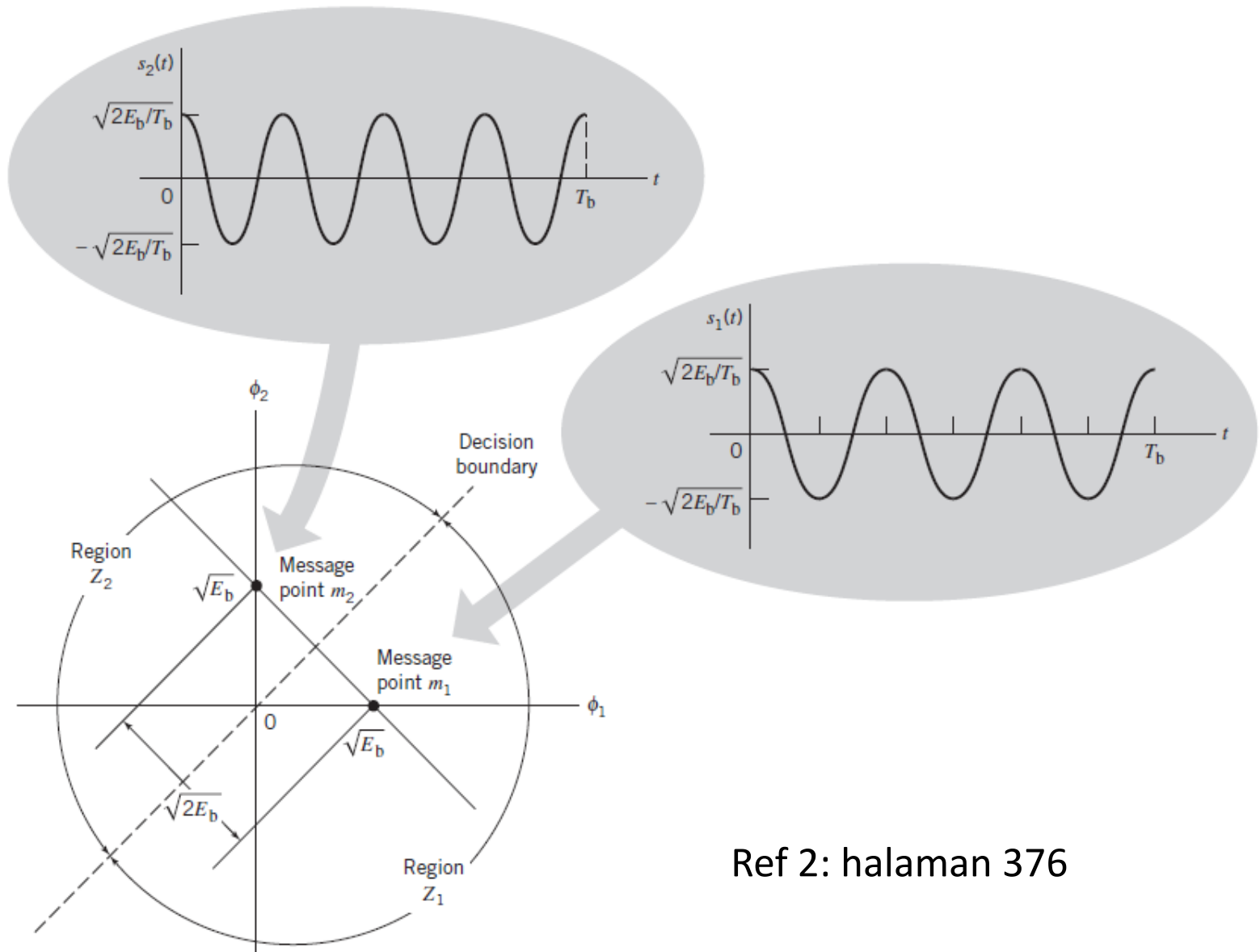
$$s_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_1 t), & \text{untuk simbol 1,} & i = 1 \\ \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_2 t), & \text{untuk simbol 0,} & i = 2 \end{cases}$$

- T_b adalah durasi bit dan E_b adalah energi sinyal yang ditransmisikan per bit, frekuensi gelombang pembawa f_1 dan f_2 , nilainya dipilih berbeda sebesar $\Delta f = k/2T_b$ Hz.
- Merupakan dua sinyal yang **orthogonal**, artinya:

$$\int_0^{T_b} s_1(t)s_2(t)dt = 0$$

2.2. Frequency Shift Keying (FSK) (2)

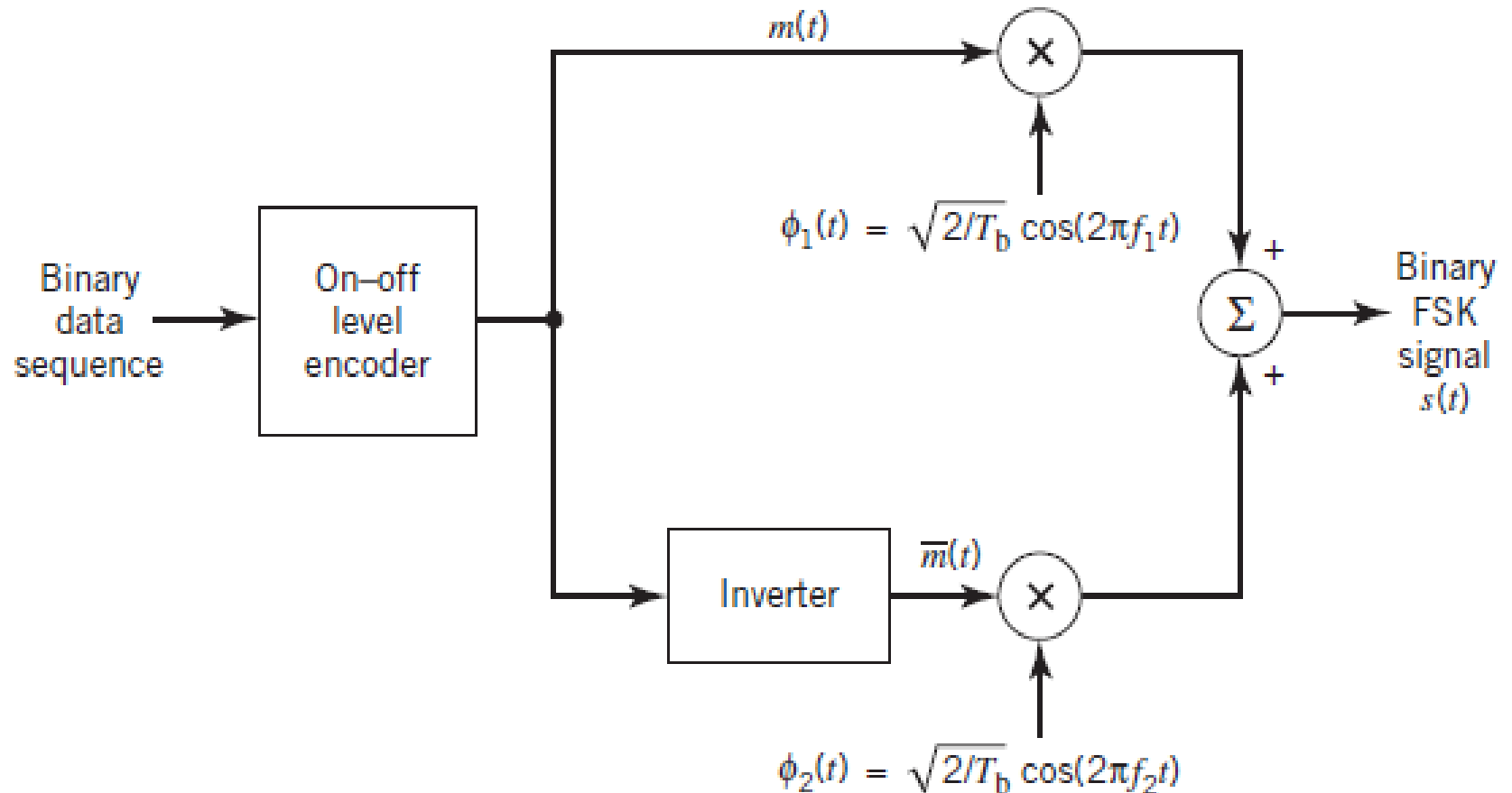
- BFSK:



Ref 2: halaman 376

2.2. Frequency Shift Keying (FSK) (3)

- Diagram blok pemancar BFSK:



- Ref 2: halaman 377

2.2. Frequency Shift Keying (FSK) (4)

- Bentuk gelombang:

$$T = 0,5 \text{ det}$$

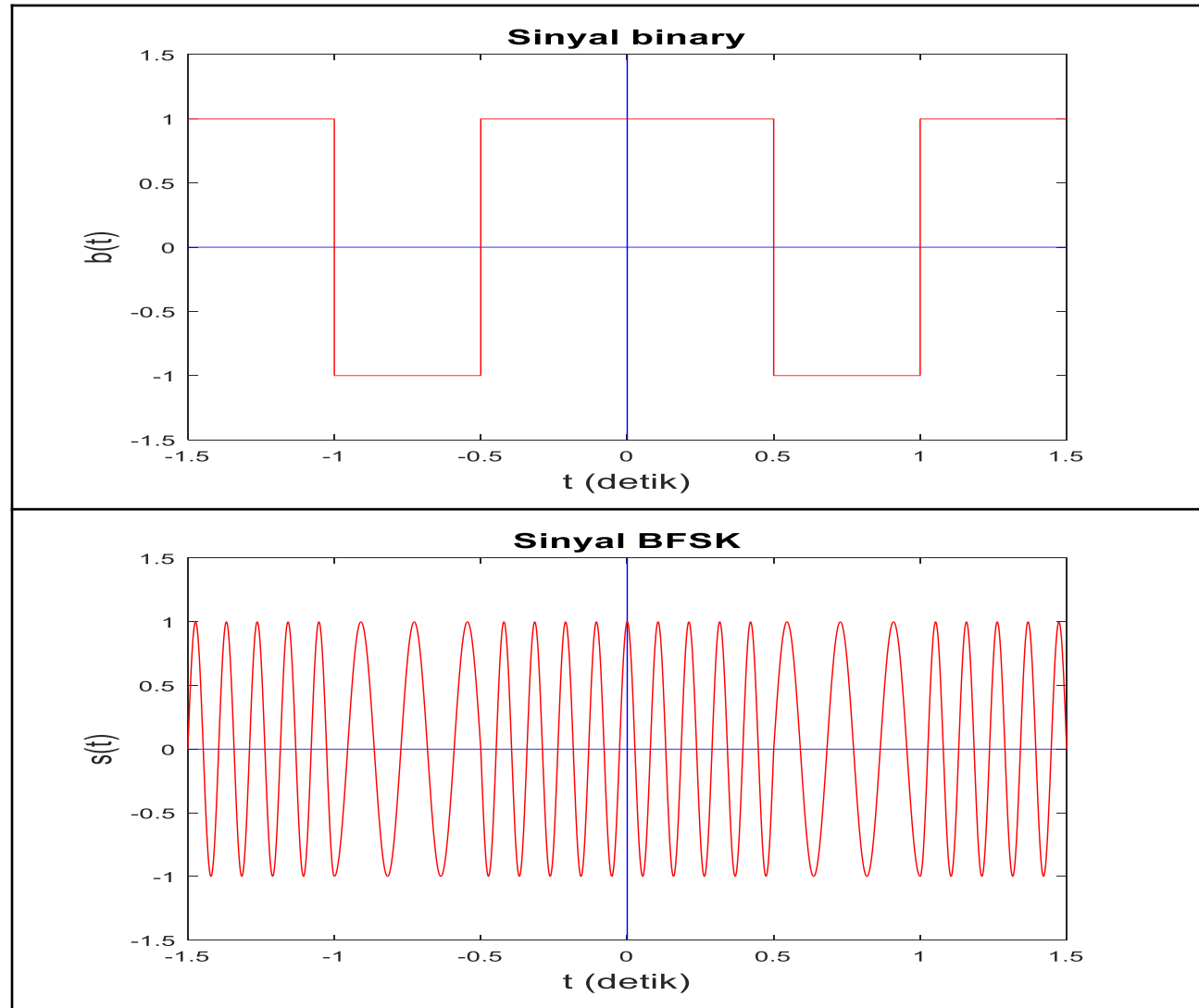
$$R = \frac{1}{T} = 2 \text{ bps}$$

$$\Delta f = \frac{k}{2T} = k \text{ Hz}$$

- Dipakai:

$$f_0 = 15 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = 4 \text{ Hz}$$



2.3. Phase Shift Keying (PSK) (1)

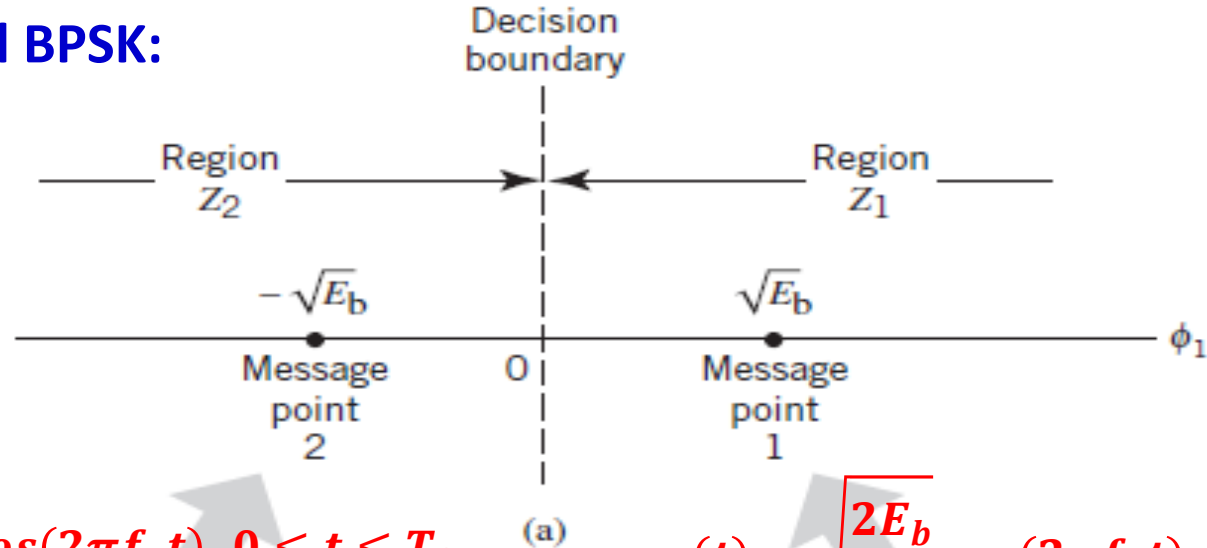
- Bentuk paling sederhana Phase Shift Keying adalah Binary Phase Shift Keying (BPSK), dengan persamaan:

$$s_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), & \text{untuk simbol 1,} \quad i = 1 \\ -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), & \text{untuk simbol 0,} \quad i = 2 \end{cases}$$

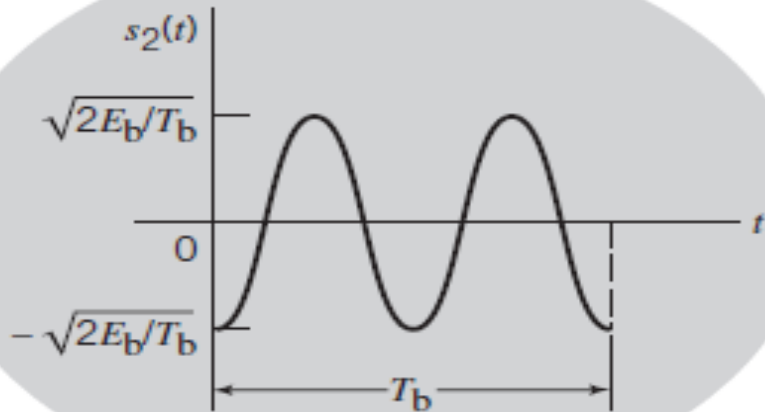
- T_b adalah durasi bit dan E_b adalah energi sinyal yang ditransmisikan per bit, frekuensi gelombang pembawa nilainya dipilih: $f_c = n_c/T_b \text{ Hz}$, n_c bilangan bulat.
- Sinyal diatas disebut **sinyal antipodal**.

2.3. Phase Shift Keying (PSK) (2)

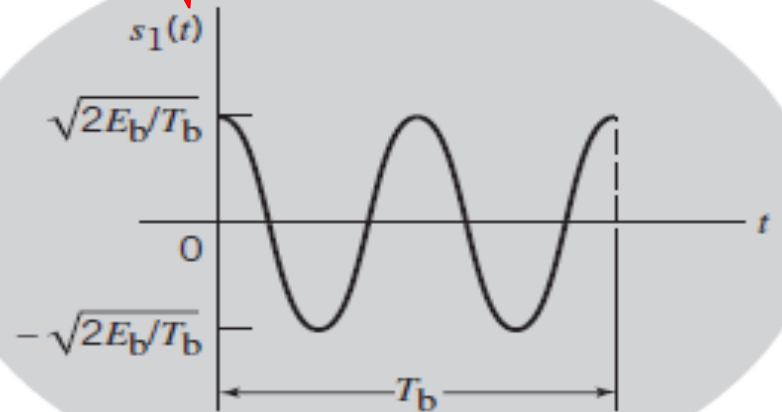
- Ruang sinyal BPSK:



$$s_2(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T_b$$

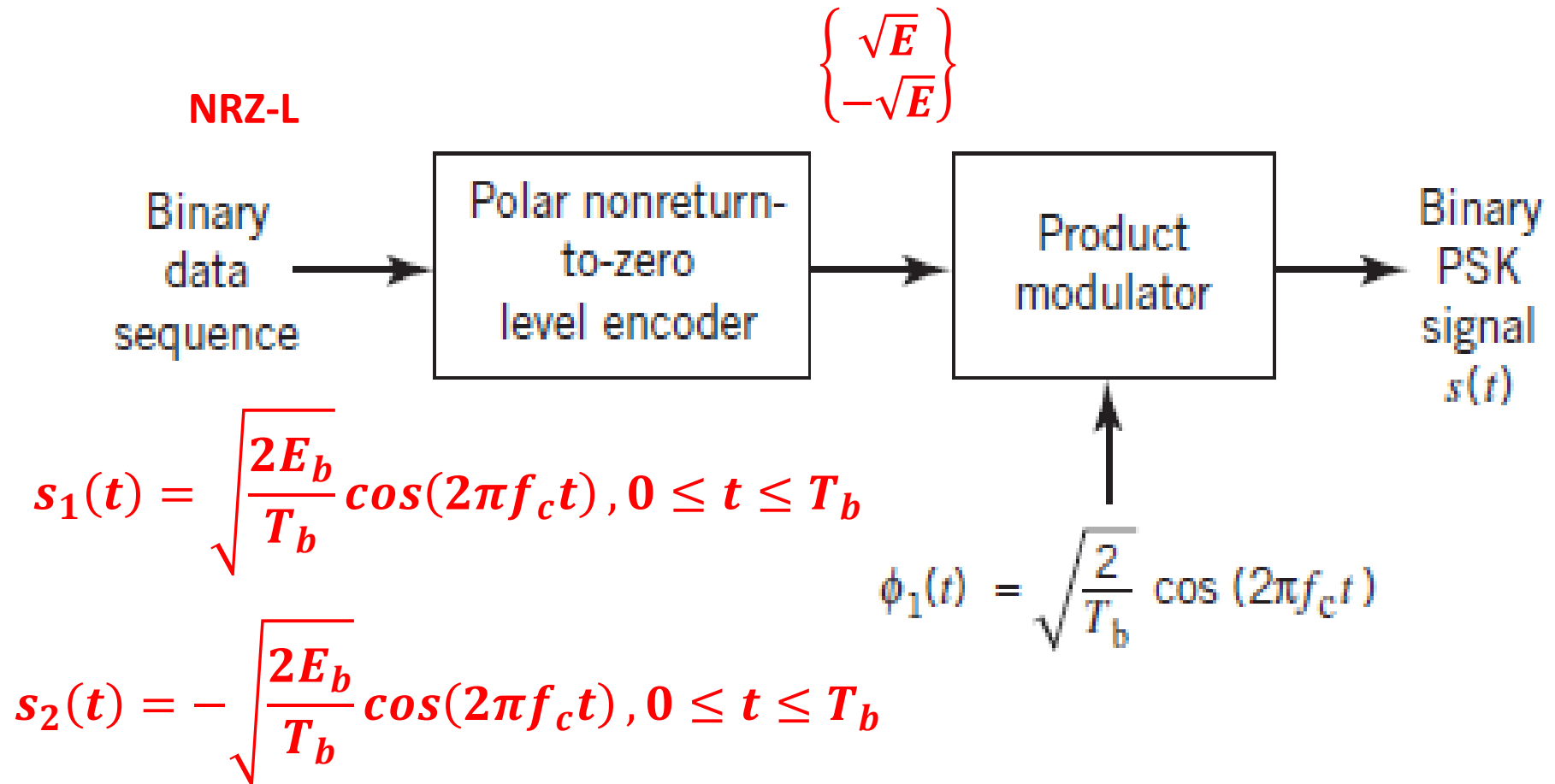


$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T_b$$



2.3. Phase Shift Keying (PSK) (3)

- Diagram blok pemancar BPSK:

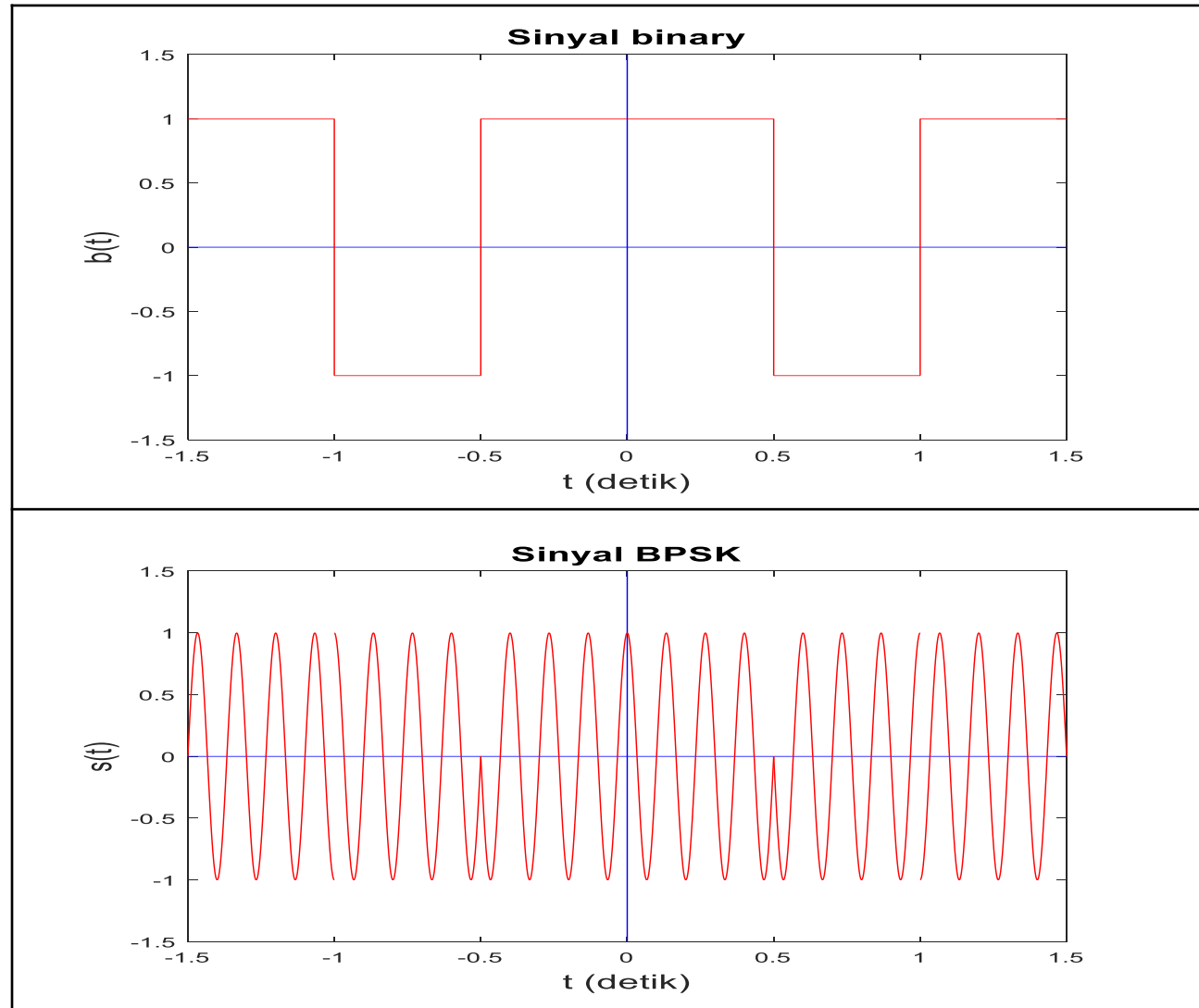


2.3. Phase Shift Keying (PSK) (4)

- Bentuk gelombang:

$$T = 0,5 \text{ det}$$
$$R = \frac{1}{T} = 2 \text{ bps}$$

- Dipakai:
 $f_c = 7,5 \text{ Hz}$



2.4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK) (1)

- Bentuk Quadri Phase Shift Keying (QPSK), dengan persamaan:

$$s_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + (2i - 1) \frac{\pi}{4} \right], & 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ 0, & \text{nilai lain} \end{cases}$$

- T adalah durasi simbol dan E adalah energi sinyal yang ditransmisikan per simbol, frekuensi gelombang pembawa nilainya dipilih:
 $f_c = n_c / T_b \text{ Hz}$, n_c bilangan bulat.
- $T = 2T_b$, T_b adalah durasi bit.

2.4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK) (2)

- Persamaan QPSK:

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right), \quad 0 \leq t \leq T, \quad m_4 = "11"$$

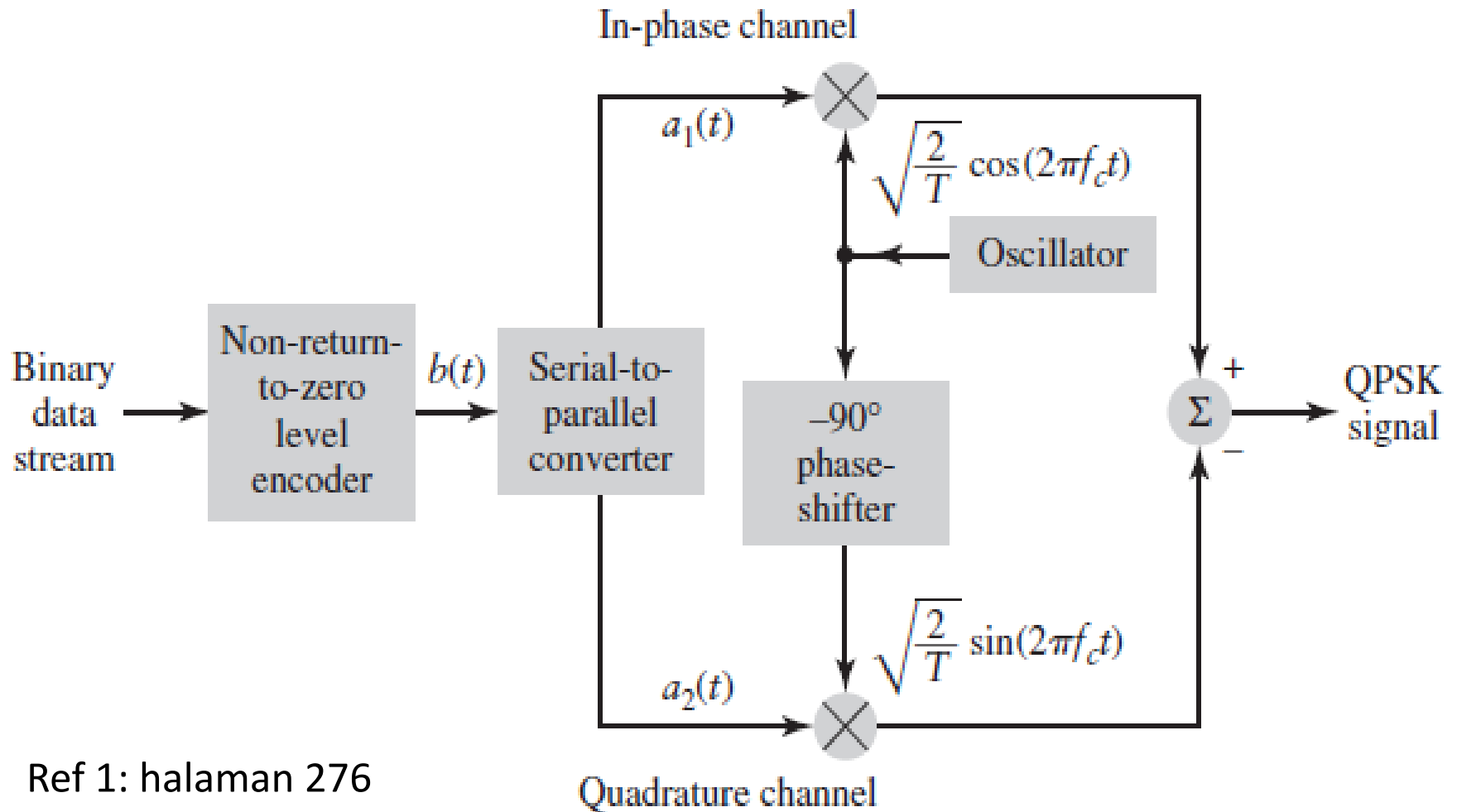
$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right), \quad 0 \leq t \leq T_b, \quad m_3 = "01"$$

$$s_3(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{5\pi}{4}\right), \quad 0 \leq t \leq T, \quad m_2 = "00"$$

$$s_4(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{7\pi}{4}\right), \quad 0 \leq t \leq T, \quad m_1 = "10"$$

2.4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK) (3)

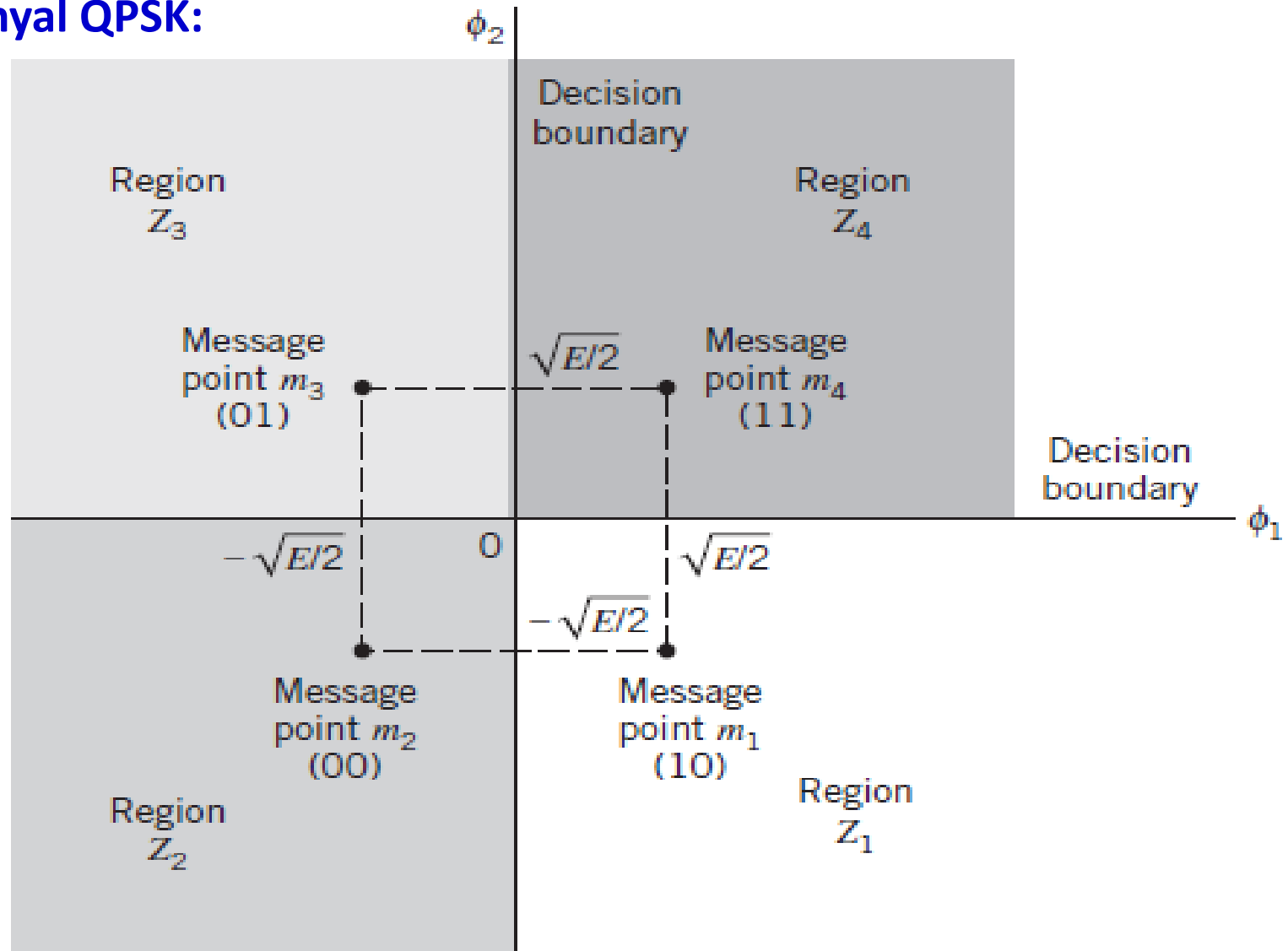
- Diagram blok pengirim QPSK:



- Ref 1: halaman 276

2.4. Quadri Phase Shift Keying (QPSK) (4)

- Ruang sinyal QPSK:



3. Materi bagian kedua

1. Pengenalan Skema Modulasi Digital M-ary
2. M-ary Phase Shift Keying
3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation.
4. M-ary Frequency Shift Keying.
5. M-ary Amplitude Shift Keying.

3.1. Pengenalan Skema Modulasi Digital M-ary

- Diskema modulasi digital M-ary, dikirimkan salah satu sinyal dari kemungkinan M sinyal-sinyal: $s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M-1}(t), s_M(t)$ selama tiap interval simbol dengan durasi T .
- Jumlah sinyal yang : $M = 2^m$, m adalah bilangan bulat.
- Durasi simbol: $T = mT_b$, T_b adalah durasi bit.

Bit	Simbol	M	Bit	Simbol	M	Bit	Simbol	M
0	$s_1(t)$	2	00	$s_1(t)$	4	000	$s_1(t)$	8
1	$s_2(t)$		01	$s_2(t)$		001	$s_2(t)$	
			10	$s_3(t)$		010	$s_3(t)$	
			11	$s_4(t)$		011	$s_4(t)$	
						100	$s_5(t)$	
						101	$s_6(t)$	
						110	$s_7(t)$	
						111	$s_8(t)$	

3.2. M-ary Phase Shift Keying (1)

- Persamaan MPSK:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} (i - 1) \right], \quad 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$
$$\theta_i = \frac{2\pi}{M} (i - 1), \quad i = 1, 2, \dots, M$$

- Frekuensi gelombang pembawa $f_c = n_c / (2T)$ Hz, n_c bilangan bulat.
- Simbol-simbol ditransmisikan dengan durasi yang sama T dan mempunyai energi yang sama E .
- Setiap $s_i(t)$ dapat ditulis dalam besaran 2 fungsi basis $\phi_1(t)$ dan $\phi_2(t)$, konstelasi sinyal M-ary PSK adalah 2 dimensi.

3.2. M-ary Phase Shift Keying (2)

- **Spektrum daya sinyal MPSK**

- Durasi simbol MPSK:

$$T = T_b \log_2 M, T_b = \text{durasi bit}$$

- Rapat spektral daya sinyal MPSK baseband:

$$S_B(f) = 2E \text{sinc}^2(Tf) = 2E_b (\log_2 M) \text{sinc}^2(T_b f \log_2 M)$$

- Bandwidth kanal yang dibutuhkan untuk melewati sinyal M-ary PSK melalui sebuah kanal analog adalah:

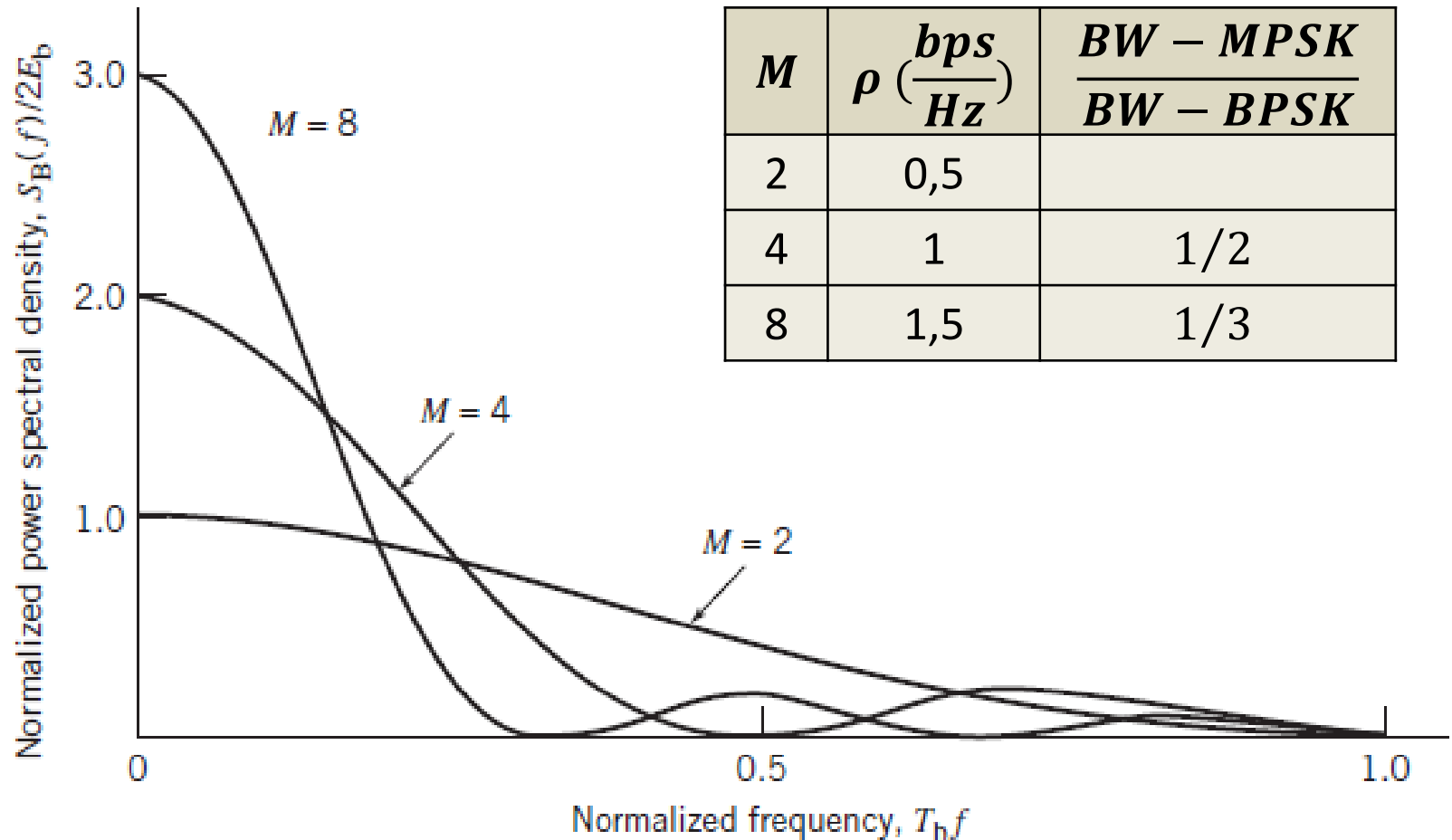
$$B = \frac{2}{T}, \quad T = \text{durasi simbol}$$

- Dari hubungan $T = T_b \log_2 M$ dan $R_b = 1/T_b$, maka bandwidth B dan efisiensi bandwidth ρ :

$$B = \frac{2R_b}{\log_2 M}, \text{ dan } \rho = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2 M}{2}$$

3.2. M-ary Phase Shift Keying (3)

- Spektrak daya MPSK; DSD baseband: $G_{xB}(f)/2E_b$ vs $T_b f$



3.2. M-ary Phase Shift Keying (4)

- Persamaan efisiensi bandwidth:

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2 M}{2}$$

- Tabel:

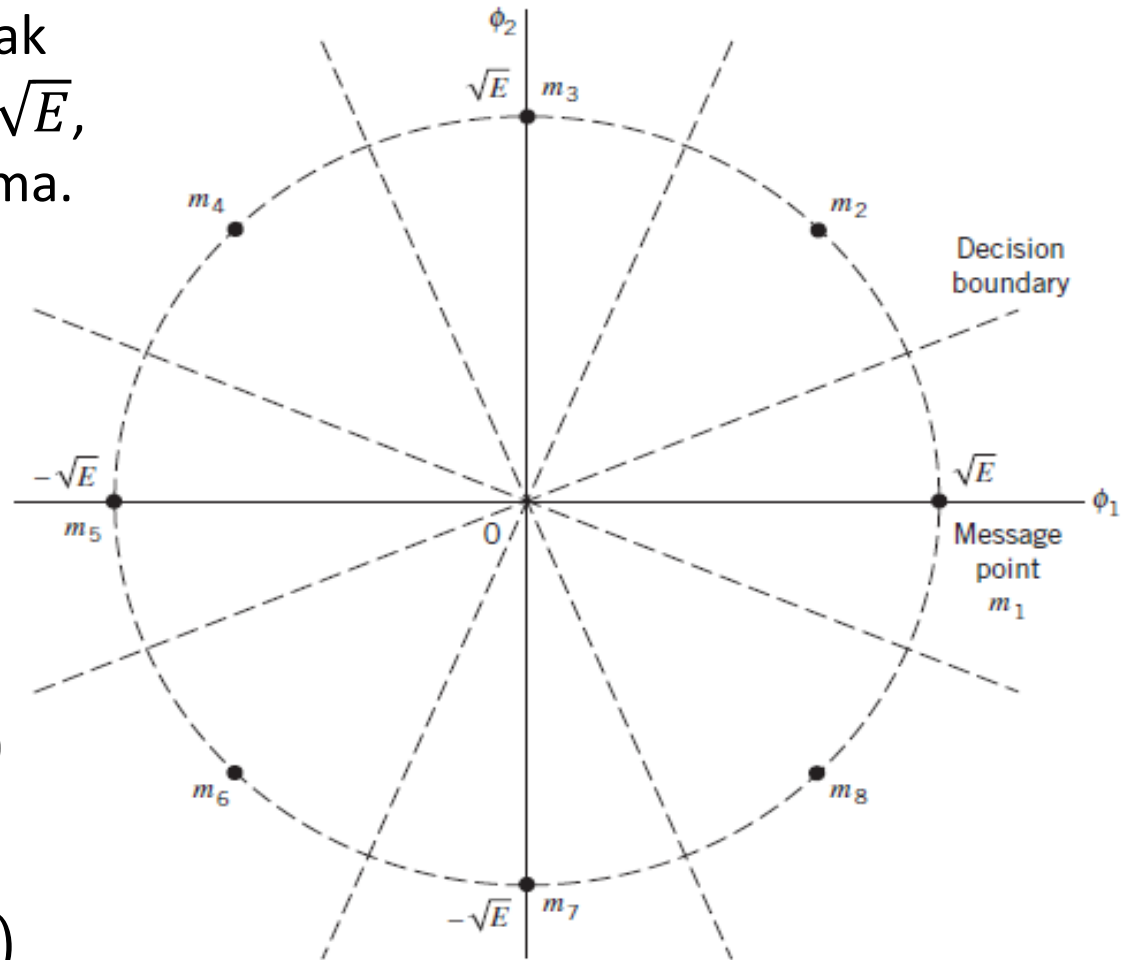
k	M	$\rho \left(\frac{bps}{Hz} \right)$	$\frac{BW - MPSK}{BW - BPSK}$	$k \sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right)$	$\frac{Energi - MPSK}{Energi - BPSK}$
1	2	0,5			
2	4	1	1/2	1,0	
3	8	1,5	1/3	0,44	3,6 dB
4	16	2	1/4	0,15	8,2 dB
5	32	2,5	1/5	0,05	13,0 dB
6	64	3	1/6	0,0144	17,0 dB

- Effisiensi bandwidth \uparrow , tetapi energi harus diperbesar untuk mendapatkan probabilitas error yang baik.

3.2. M-ary Phase Shift Keying (5)

- **Diagram ruang sinyal 8-PSK:**

- Ada 8 titik message, terletak dilingkaran dengan radius \sqrt{E} , jarak tiap titik message sama.
- Simetris sirkular.
- $m_1 = (\sqrt{E}, 0)$
- $m_2 = (0,5\sqrt{2E}, 0,5\sqrt{2E})$
- $m_3 = (0, \sqrt{E})$
- $:$
- $m_6 = (-0, \sqrt{E}, -0,5\sqrt{2E})$
- $m_7 = (0, -\sqrt{E})$
- $m_8 = (0,5\sqrt{2E}, -0,5\sqrt{2E})$



3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation (1)

- Disistem M-ary PSK, komponen in-phase dan komponen kuadratur sinyal termodulasi saling terkait dengan suatu cara sehingga selubung sinyal tetap konstan. Batasan ini membuat konstelasi sinyal (titik-titik message) berada disebuah lingkaran.
- Apabila batasan bahwa komponen in-phase dan kuadratur saling terkait dihilangkan, artinya komponen in-phase dan kuadratur saling bebas, kita mempunyai skema modulasi yang disebut **M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-ary QAM)**.
- **QAM** adalah sebuah bentuk **modulasi hybrid**, dimana gelombang pembawa mengalami **modulasi amplituda dan modulasi fasa**.
- Diagram ruang sinyal M-ary PAM (M-ary ASK) adalah 1 dimensi, sedangkan diagram ruang sinyal M-ary QAM adalah generalisasi 2 dimensi M-ary PAM.

3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation (2)

- QAM memakai 2 fungsi basis orthogonal passband:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T$$

- Bila d_{min} adalah jarak minimum diantara dua titik message sembarang di konstelasi QAM, maka proyeksi titik message ke i pada sumbu ϕ_1 dan ϕ_2 adalah:

$$a_i \frac{d_{min}}{2} \text{ dan } b_i \frac{d_{min}}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

- Separasi antara 2 titik message didiagram ruang sinyal sebanding dengan akar energi, kita dapat membuat:

$$\frac{d_{min}}{2} = \sqrt{E_0}$$

3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation (3)

- Separasi antara 2 titik message didiagram ruang sinyal

$$\frac{d_{min}}{2} = \sqrt{E_0}$$

E_0 = energi sinyal message dengan amplituda terkecil

- Persamaan M-ary QAM:

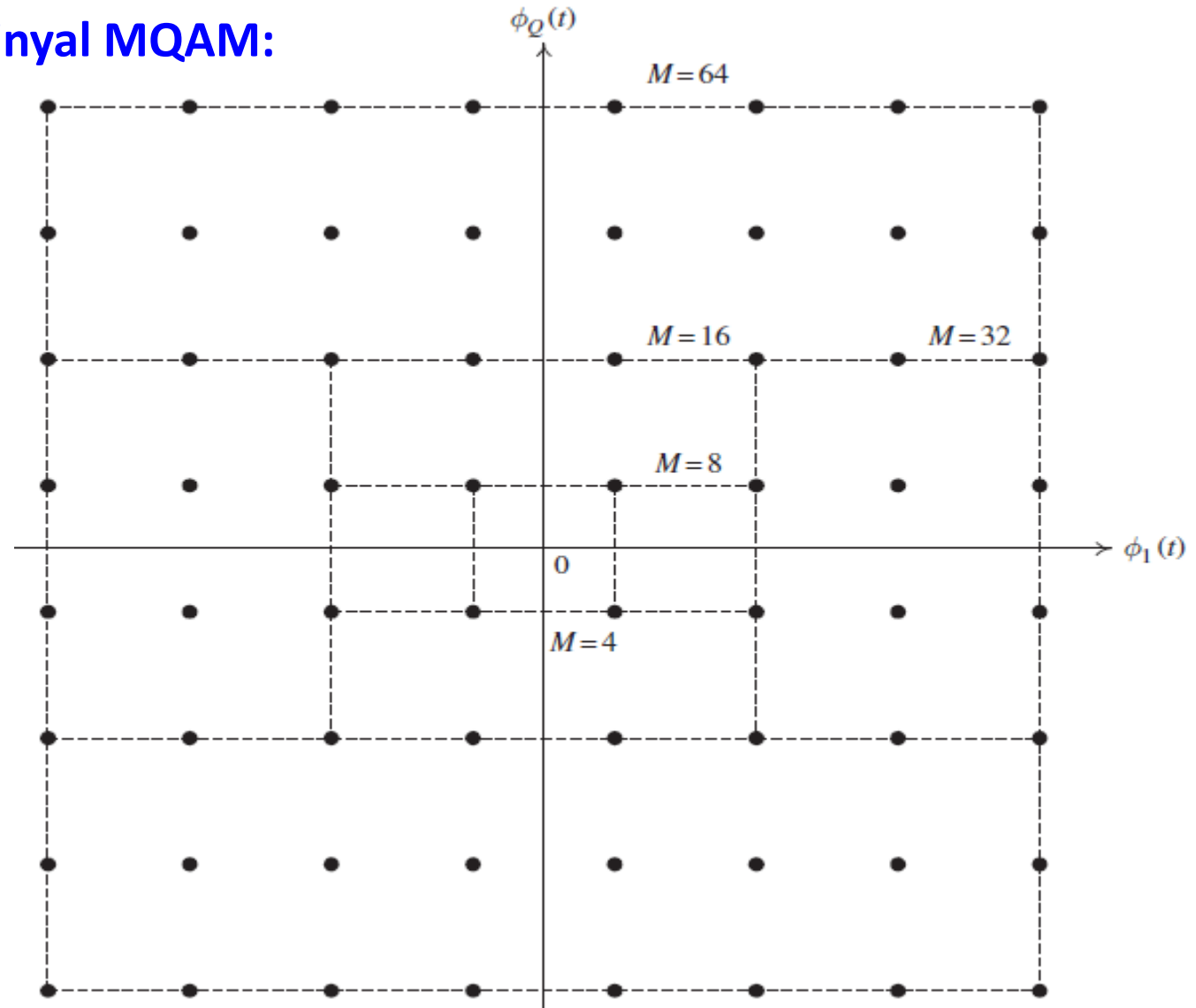
$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_k \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_k \sin(2\pi f_c t), \begin{cases} 0 \leq t \leq T \\ k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$

- Konstelasi titik-titik message tergantung dari jumlah simbol-simbol yang mungkin.

3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation (4)

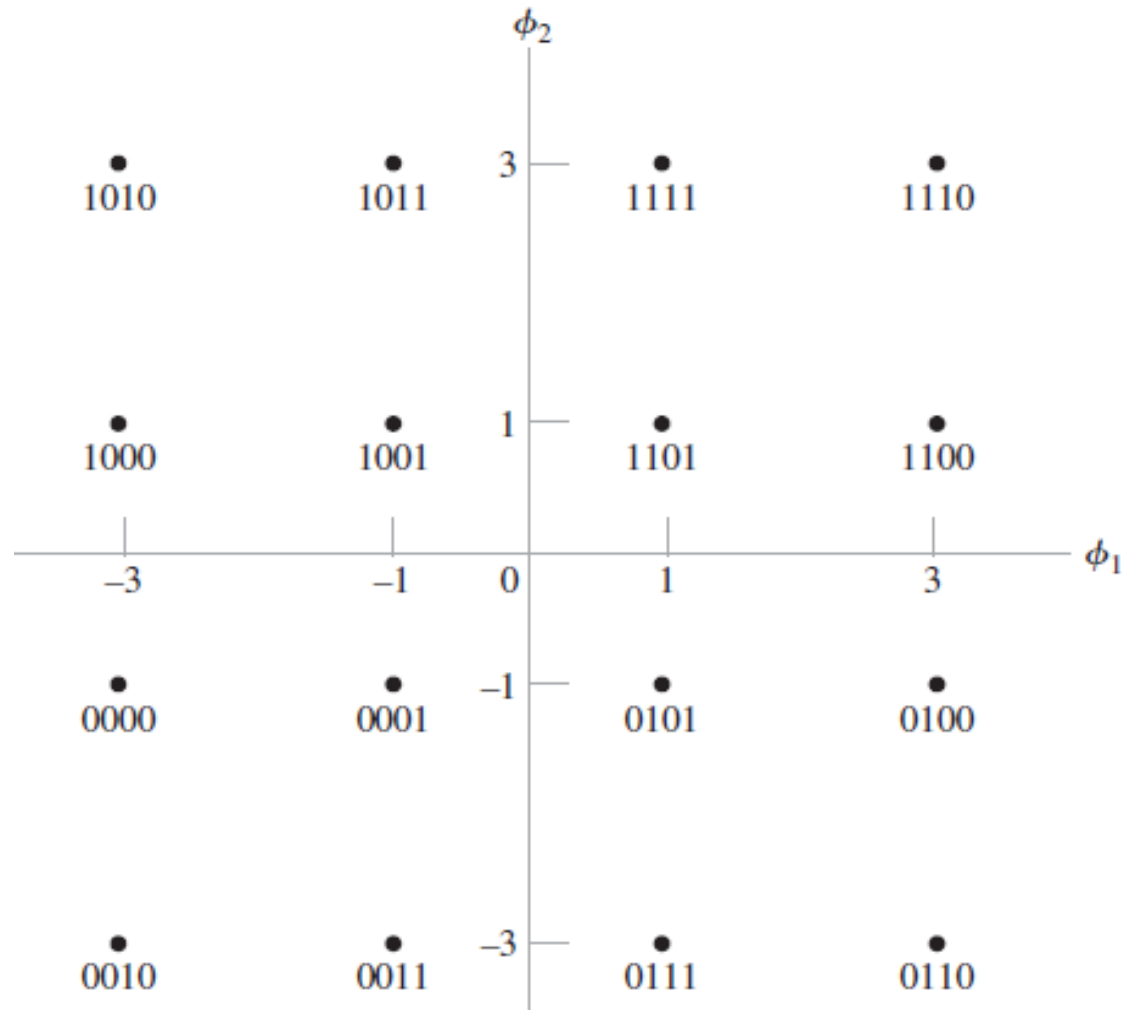
- Diagram ruang sinyal MQAM:

- 4QAM
- 8QAM
- 16QAM
- 32QAM
- 64QAM



3.3. M-ary Quadrature Amplitude Modulation (5)

- Diagram ruang sinyal 16-QAM:



3.4. M-ary Frequency Shift Keying (1)

- **Persamaan MFSK:**

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[\frac{\pi}{T} (n_c + i)t \right], \quad 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$

- Frekuensi gelombang pembawa $f_c = n_c/(2T)$ Hz, n_c bilangan bulat.
- Simbol-simbol ditransmisikan dengan durasi yang sama T dan mempunyai energi yang sama E .
- Karena setiap frekuensi sinyal dipisahkan sebesar $1/(2T)$ Hz, maka sinyal MFSK:

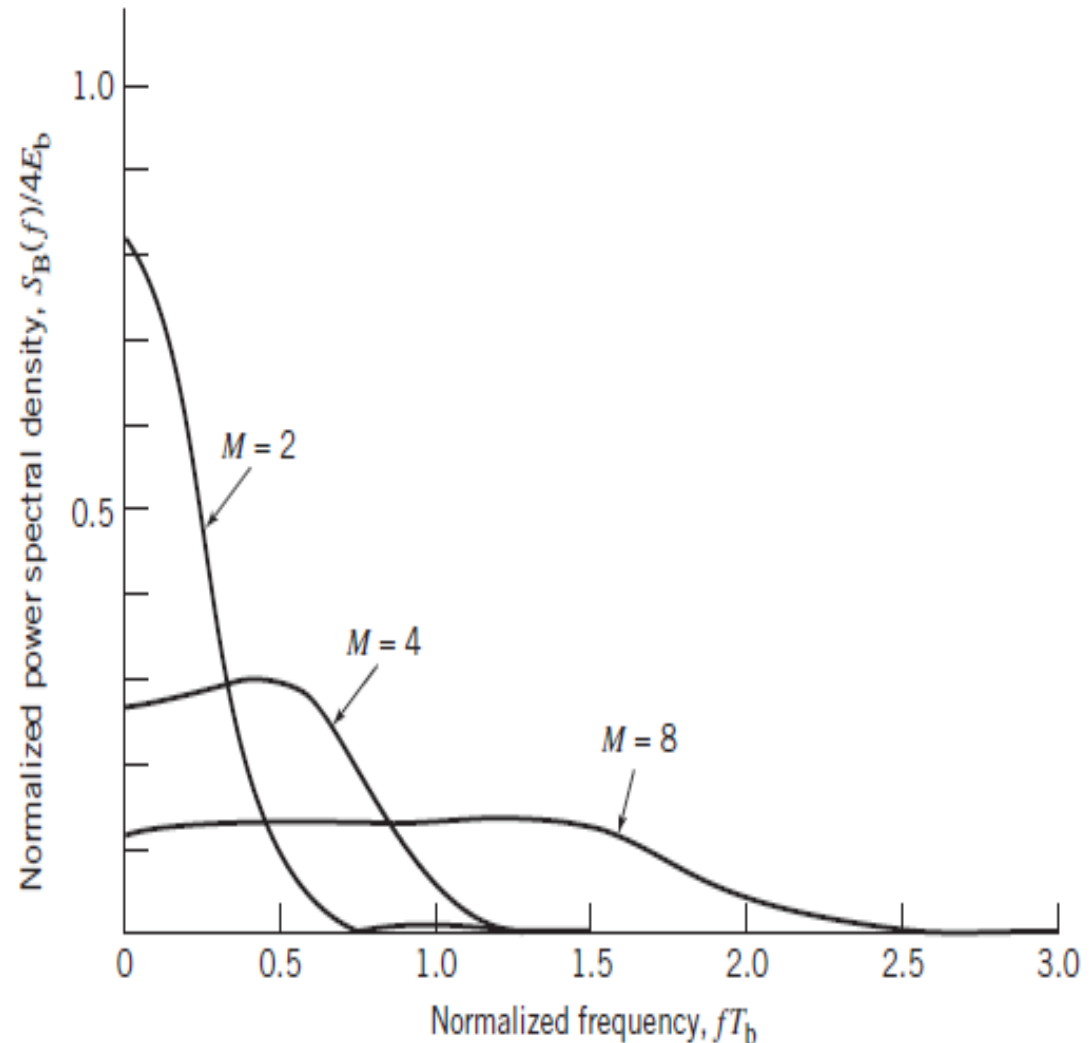
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[\frac{\pi}{T} (n_c + i)t \right], \quad 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$

- Merupakan himpunan orthogonal, artinya:

$$\int_0^T s_i(t)s_j(t)dt = 0, \quad i \neq j$$

3.4. M-ary Frequency Shift Keying (2)

- **Spektrum Daya Sinyal MFSK**
- Analisis spektral sinyal M-ary FSK lebih rumit dari pada analisis spektral sinyal M-ary PSK.
- Bila perbedaan frekuensi antar gelombang pembawa uniform, yaitu $1/(2T)$, T adalah durasi simbol.
- Densitas spektral daya baseband M-ary FSK diperlihatkan di gambar



3.4. M-ary Frequency Shift Keying (3)

- **Effisiensi Bandwidth Sinyal MFSK**
- Apabila sinyal-sinyal orthogonal M-ary FSK dideteksi secara koheren, sinyal-sinyal yang berdekatan, frekuensinya harus berbeda sebesar $1/2T$ agar menjaga orthogonalitas.
- **Bandwidth** yang diperlukan untuk transmisi M-ary FSK adalah:

$$B = \frac{M}{2T} \text{ Hz.}$$

- Karena $T = T_b \log_2 M$, dan $R_b = 1/T_b$, maka:

$$B = \frac{R_b M}{2 \log_2 M} \text{ Hz.}$$

- **Effisiensi bandwidth:**

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{2 \log_2 M}{M} \text{ bits/s/Hz}$$

$$\frac{BW - MFSK}{BW - BFSK} = \frac{M}{2 \log_2 M}$$

3.4. M-ary Frequency Shift Keying (4)

- Persamaan efisiensi bandwidth sinyal MFSK:

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{2 \log_2 M}{M}$$

- Tabel:

k	M	$\rho \left(\frac{bps}{Hz} \right)$	$\frac{BW - MFSK}{BW - BFSK}$	$\frac{Energi - MFSK}{Energi - BFSK}$
1	2	1		
2	4	1	1	0 dB
3	8	0,75	1,333	0 dB
4	16	0,5	2	0 dB
5	32	0,3125	3,2	0 dB
6	64	0,1875	5,333	0 dB

- Effisiensi bandwidth ↓, tetapi energi tetap sama.

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (1)

- **Persamaan MASK:**

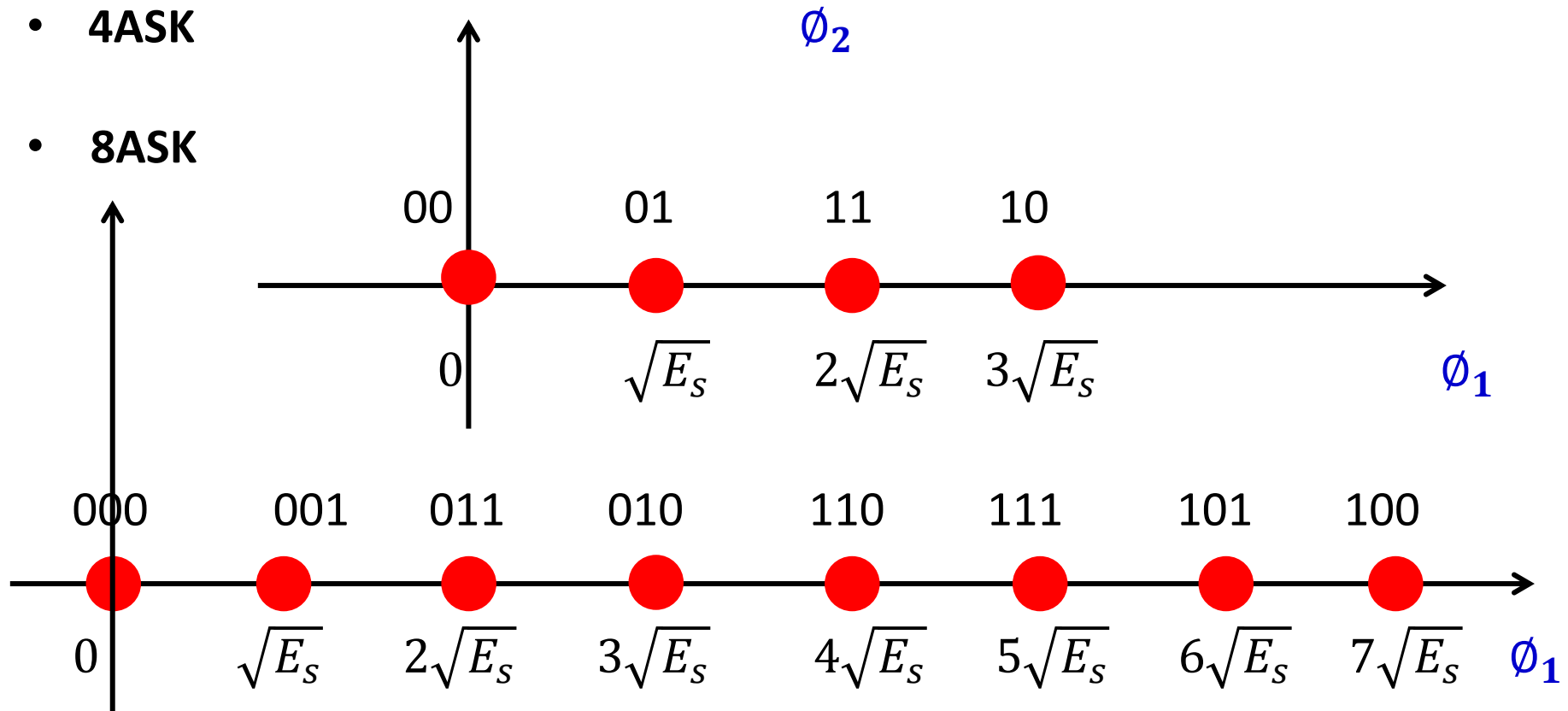
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i}{T}} \cos[2\pi f_c t], \quad 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$$

- Frekuensi gelombang pembawa $f_c = n_c/(T)$ Hz, n_c bilangan bulat.
- Simbol-simbol ditransmisikan dengan durasi yang sama T dan mempunyai energi E_i .
- Setiap $s_i(t)$ dapat ditulis dalam besaran fungsi basis $\phi_1(t)$, konstelasi sinyal M-ary ASK adalah 1 dimensi.

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos[2\pi f_c t], \quad 0 \leq t \leq T$$

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (2)

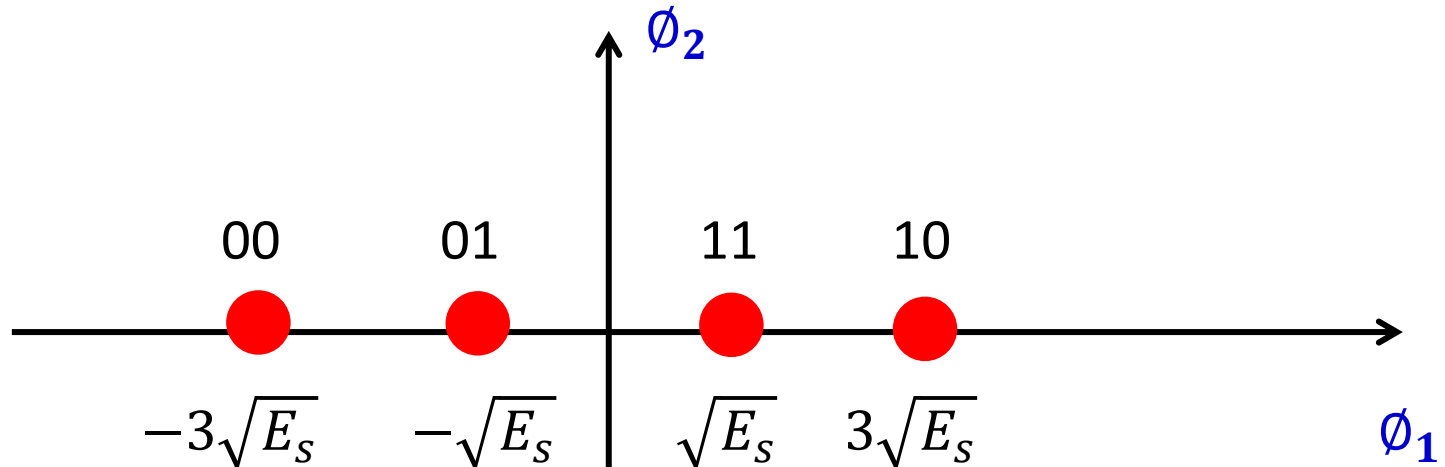
- Ruang sinyal: unipolar memakai kode Gray
- 4ASK
- 8ASK



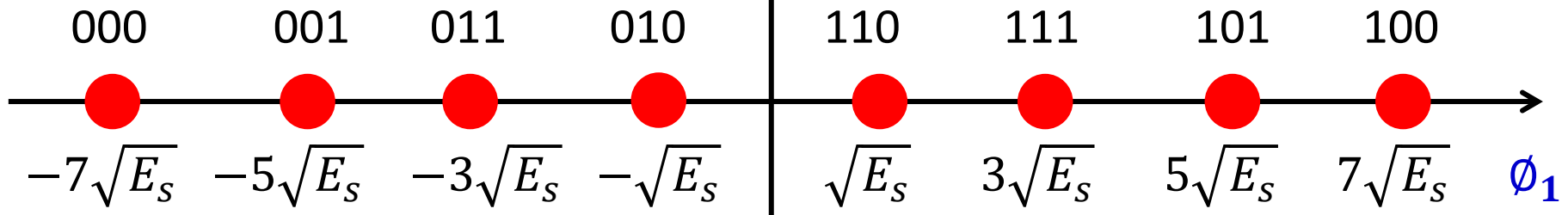
$$d_{min} = d = \sqrt{E_s}$$

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (3)

- Ruang sinyal: bipolar memakai kode Gray
- 4ASK



- 8ASK



- Dicontoh ini $d_{min} = d = 2\sqrt{E_s}$

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (4)

- Simbol-simbol equally likely:
- 4ASK:

$$d_{\min} = 2\sqrt{E_s}, \quad \text{maka } \bar{E} = \frac{1}{4}(9E_s + E_s + E_s + 9E_s) = 5E_s$$

$$d_{\min} = \sqrt{E_s}, \quad \text{maka } \bar{E} = \frac{1}{4}\left(\frac{9}{4}E_s + \frac{1}{4}E_s + \frac{1}{4}E_s + \frac{9}{4}E_s\right) = \frac{20}{16}E_s$$

- 8ASK:

$$d_{\min} = 2\sqrt{E_s}, \quad \text{maka } \bar{E} = \frac{1}{8}(49E_s + 25E_s + \dots + 25E_s + 49E_s)$$
$$\bar{E} = \frac{168}{8}E_s = 21E_s$$

$$d_{\min} = \sqrt{E_s}, \quad \text{maka } \bar{E} = \frac{1}{8}\left(\frac{49}{4}E_s + \frac{25}{4}E_s + \dots + \frac{25}{4}E_s + \frac{49}{4}E_s\right)$$
$$\bar{E} = \frac{168}{32}E_s = 5,25E_s$$

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (5)

- Simbol-simbol equally likely:
- Persamaan umum:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i$$

$$\text{Bila } d_{\min} = 2\sqrt{E_s}, \text{ maka } \bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (2i - 1 - M)^2 E_s$$

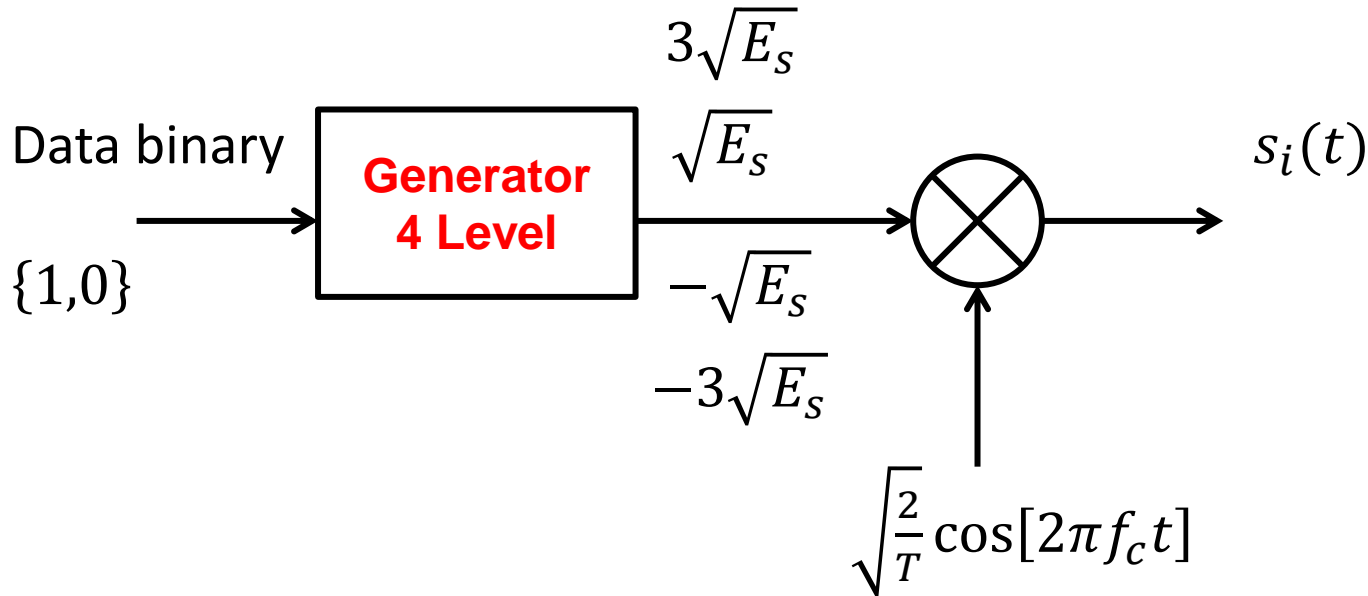
$$\bar{E} = \frac{1}{M} \frac{M(M^2 - 1)}{3} E_s = \frac{(M^2 - 1)}{3} E_s$$

$$\text{Bila } d_{\min} = \sqrt{E_s}, \text{ maka } \bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (2i - 1 - M)^2 \frac{E_s}{4}$$

$$\bar{E} = \frac{(M^2 - 1)}{12} E_s$$

3.4. M-ary Amplitude Shift Keying (6)

- Contoh 4ASK:



- Persamaan 4ASK:

$$s_i(t) = A_i \sqrt{\frac{2}{T}} \cos[2\pi f_c t], \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, 3, 4$$
$$A_i = (2i - 5)\sqrt{E_s}, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Alphabet Greek

A	α	Alpha		I	ι	Iota		P	ρ	Rho
B	β	Beta		K	κ	Kappa		Σ	σ	Sigma
Γ	γ	Gamma		Λ	λ	Lambda		T	τ	Tau
Δ	δ	Delta		M	μ	Mu		Y	υ	Upsilon
E	ε	Epsilon		N	ν	Nu		Φ	ϕ	Phi
Z	ζ	Zeta		Ξ	ξ	Xi		X	χ	Chi
H	η	Eta		O	\omicron	Omicron		Ψ	ψ	Psi
H	θ	Theta		Π	π	Pi		Ω	ω	omega

Referensi:

1. Simon Haykin, Michael Moher, Introduction to Analog & Digital Communications, 2nd Edition, Wiley, 2007. Chapter 7.
2. Simon Haykin, Digital Communication Systems, Wiley, 2014. Chapter 7.

- Transmisi Digital Passband
- Selesai