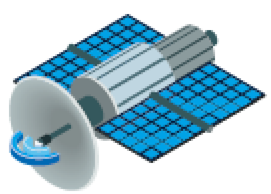
강의교안 이용 안내

- 본 강의교안의 저작권은 **김영길**과 **한빛아카데미㈜**에 있습니다.
- 이 자료를 무단으로 전제하거나 배포할 경우 저작권법 136조에 의거하여 벌금에 처할 수 있고 이를 병과(倂科)할 수도 있습니다.



기초
통신이론
디지털 통신 중심으로

CHAPTER 10
디지털 복조

한빛아카데미
Hanbit Academy, Inc.

Contents

10.1 신호 공간으로의 투영

10.1 신호 공간으로의 투영

- **수신신호**

$$r(t) = s_m(t) + n(t) \qquad (10.1)$$

  - $n(t)$는 자기상관함수가 $\frac{N_0}{2}\delta(\tau)$ 인 AWGN
  - $m = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots,\ M-1$

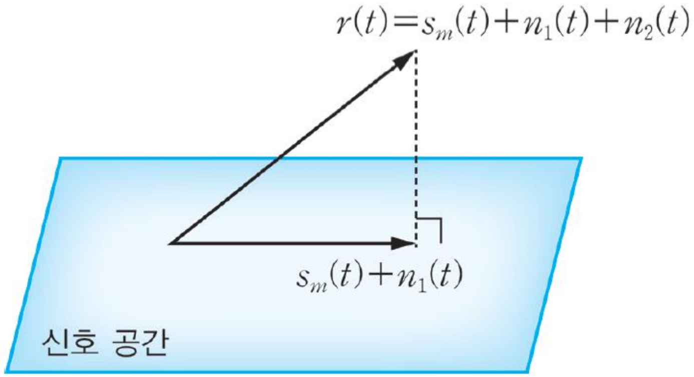
- **신호 공간은 다음과 같다고 가정**

$$\{c_1 \cos 2\pi f_c t + c_2 \sin 2\pi f_c t \mid c_1,\ c_2 \text{는 실수}\}$$

이 신호 공간의 정규 직교 베이시스는

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t,\ \ \phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$$

10.1 신호 공간으로의 투영



[그림 10-1] 수신 신호 $r(t)$의 투영 후의 신호 $s_m(t) + n_1(t)$

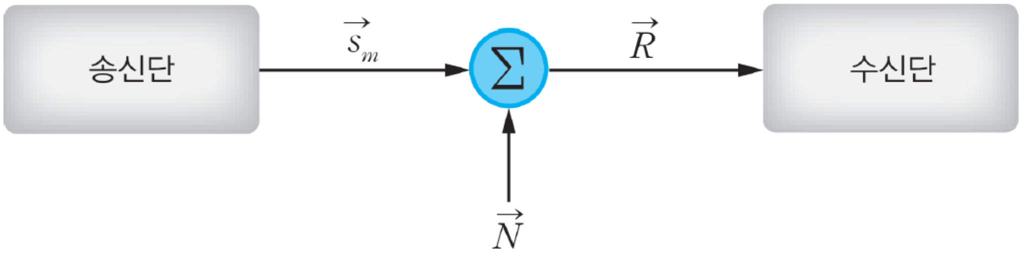
$$s_m(t) + n_1(t) = R_1 \phi_1(t) + R_2 \phi_2(t) \tag{10.3}$$

10.1 신호 공간으로의 투영

$$R_1 = \int_0^{T_s} r(t)\phi_1(t)dt = \int_0^{T_s} \{s_m(t) + n(t)\}\phi_1(t)dt = s_{m,1} + N_1$$

$$R_2 = \int_0^{T_s} r(t)\phi_2(t)dt = \int_0^{T_s} \{s_m(t) + n(t)\}\phi_2(t)dt = s_{m,2} + N_2 \tag{10.8}$$

$$\overrightarrow{R} = \overrightarrow{s}_m + \overrightarrow{N} \tag{10.12}$$



[그림 10-2] 벡터 채널 모델

10.1 신호 공간으로의 투영

예제 10-1

구간 $0 < t < T_s$ 에서 변조된 신호들의 신호 공간이 $\{c_1 \cos 2\pi f_c t + c_2 \sin 2\pi f_c t \mid c_1,\ c_2$는 실수$\}$이고, 이 신호 공간의 정규 직교 베이시스가 $\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t$, $\phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$, 수신 신호가 $r(t) = s_m(t) + n(t)$ 일 때, 수신 벡터 $\vec{R}$과 잡음 벡터 $\vec{N}$을 구하시오.

풀이

신호 공간이 $\{c_1 \cos 2\pi f_c t + c_2 \sin 2\pi f_c t \mid c_1,\ c_2$는 실수$\}$이므로 2차원 변조이다. 따라서 수신 벡터는 $\vec{R} = (R_1,\ R_2)$이고 잡음 벡터는 $\vec{N} = (N_1,\ N_2)$이다. $R_1 = \langle r(t),\ \phi_1(t) \rangle$, $R_2 = \langle r(t),\ \phi_2(t) \rangle$, $N_1 = \langle n(t),\ \phi_1(t) \rangle$, $N_2 = \langle n(t),\ \phi_2(t) \rangle$이므로 수신 벡터 $\vec{R}$과 잡음 벡터 $\vec{N}$은 다음과 같다.

$$\vec{R} = \left(\int_0^{T_s} r(t) \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t\, dt,\ -\int_0^{T_s} r(t) \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t\, dt \right)$$

$$\vec{N} = \left(\int_0^{T_s} n(t) \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t\, dt,\ -\int_0^{T_s} n(t) \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t\, dt \right)$$

10.2 최소 유클리드 거리 판정

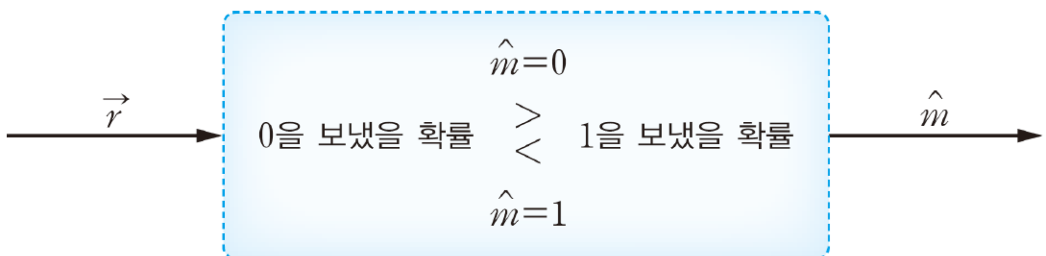
10.2 최소 유클리드 거리 판정

- **심볼오류율**

$$P_s = P(\hat{m} \neq m) = \sum_{i=0}^{M-1} P(\hat{m} \neq i \mid i)\, P_m(i) \qquad (10.13)$$

- **최대사후확률(maximum a posteriori: MAP) 판정**

$$\hat{m} = \arg\max_i P_{m \mid \vec{R}}(i \mid \vec{r}) \qquad (10.14)$$



[그림 10−3] 이진 변조의 경우 MAP 판정

10.2 최소 유클리드 거리 판정

예제 10-2

$\hat{m} = \arg\max_i P_{m|\vec{R}}(i\,|\,\vec{r})$ 과 같이 MAP 판정을 이용할 때, 수신단의 판정 $\hat{m}$을 구하시오.

(a) 4진 변조이고 $P_{m|\vec{R}}(0|\vec{r}) = 0.1$, $P_{m|\vec{R}}(1|\vec{r}) = 0.2$, $P_{m|\vec{R}}(2|\vec{r}) = 0.4$, $P_{m|\vec{R}}(3|\vec{r}) = 0.3$

(b) 이진 변조이고 $P_{m|\vec{R}}(0|\vec{r}) = 0.6$, $P_{m|\vec{R}}(1|\vec{r}) = 0.4$

풀이

(a) 4진 변조이므로 $\hat{m} = \arg\max_{i \in \{0,1,2,3\}} P_{m|\vec{R}}(i|\vec{r})$이다. $\max_{i \in \{0,1,2,3\}} P_{m|\vec{R}}(i|\vec{r})$은 사후 확률의 최댓값이므로 0.4이다. $P_{m|\vec{R}}(2|\vec{r}) = 0.4$이므로 수신단의 판정은 $\hat{m} = 2$ 이다.

(b) 이진 변조이므로 $\hat{m} = \arg\max_{i \in \{0,1\}} P_{m|\vec{R}}(i|\vec{r})$이다. $\max_{i \in \{0,1\}} P_{m|\vec{R}}(i|\vec{r})$은 사후 확률의 최댓값이므로 0.6이다. $P_{m|\vec{R}}(0|\vec{r}) = 0.6$이므로 수신단의 판정은 $\hat{m} = 0$ 이다.

10.2 최소 유클리드 거리 판정

$$P_{m|\vec{R}}(i|\vec{r}) = \frac{f_{\vec{R}|m}(\vec{r}\,|\,i)P_m(i)}{f_{\vec{R}}(\vec{r})} \qquad (10.15)$$

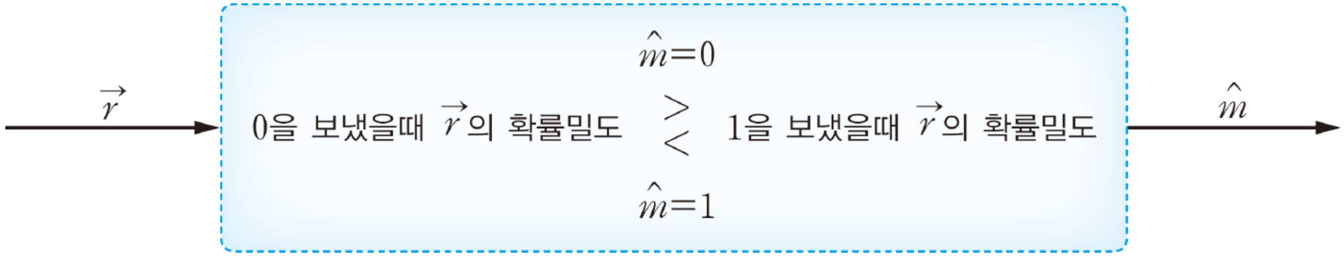
- **최대사후확률(Maximum a posteriori : MAP) 판정**

$$\hat{m} = \arg\max_i f_{\vec{R}|m}(\vec{r}\,|\,i)P_m(i) \qquad (10.16)$$

- **최대우도판정(Maximum likelihood : ML) 판정**

$$\hat{m} = \arg\max_i f_{\vec{R}|m}(\vec{r}\,|\,i) \qquad (10.17)$$

10.2 최소 유클리드 거리 판정



[그림 10-4] 이진 변조의 경우 ML 판정

$r(t)=s_m(t)+n(t)$인 AWGN 채널에서

$$\vec{N}=(N_1,\ N_2)=\left(\int_0^{T_s} n(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\cos 2\pi f_c t\,dt,\ -\int_0^{T_s} n(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\sin 2\pi f_c t\,dt\right)$$

$$\vec{s}_m=(s_{m,1},\ s_{m,2})=\left(\int_0^{T_s} s_m(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\cos 2\pi f_c t\,dt,\ -\int_0^{T_s} s_m(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\sin 2\pi f_c t\,dt\right)$$

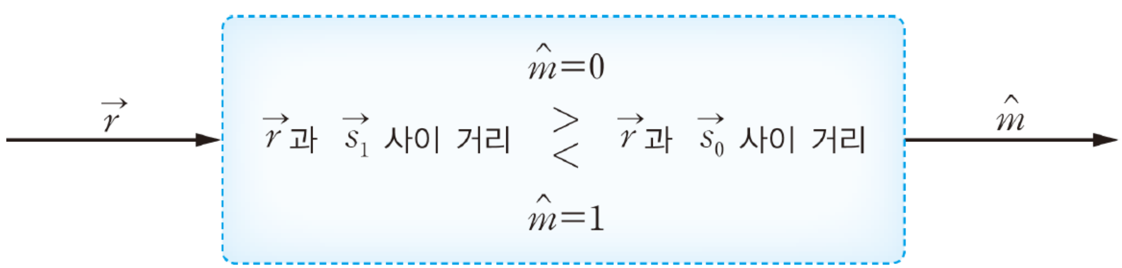
$$\vec{R}=(R_1,\ R_2)=\left(\int_0^{T_s} r(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\cos 2\pi f_c t\,dt,\ -\int_0^{T_s} r(t)\sqrt{\frac{2}{T_s}}\sin 2\pi f_c t\,dt\right)$$

10.2 최소 유클리드 거리 판정

$$f_{R_1,R_2}(r_1, r_2 \mid i) = f_{R_1}(r_1 \mid i) f_{R_2}(r_2 \mid i)$$
$$= \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{(r_1 - s_{i,1})^2 + (r_2 - s_{i,2})^2}{N_0}} = \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\| \vec{r} - \vec{s}_i \|^2}{N_0}} \quad (10.18)$$

- **AWGN 채널에서 최대우도판정(ML) 판정**

$$\hat{m} = \arg\max_i \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\| \vec{r} - \vec{s}_i \|^2}{N_0}} = \arg\min_i \| \vec{r} - \vec{s}_i \| \quad (10.19)$$

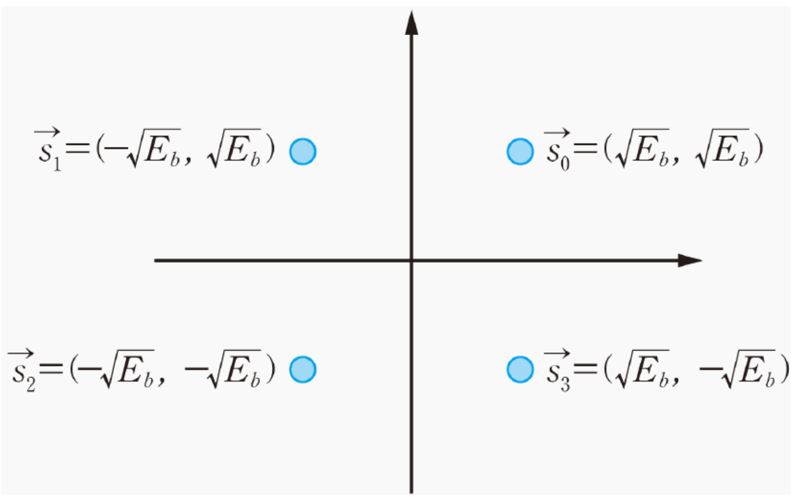


[그림 10-5] 이진 변조의 경우 최소 거리 판정

10.2 최소 유클리드 거리 판정

예제 10-4

QPSK 변조를 이용할 때 신호 성상도는 [그림 10-6]과 같다. 비트 에너지는 $E_b=1$, 수신 벡터는 $\vec{r}=(2,\ 3)$일 때, 최소 거리 판정을 이용하여 복조하시오.



[그림 10-6] QPSK 신호 성상도

10.2 최소 유클리드 거리 판정

풀이

최소 거리 판정 $\hat{m} = \arg\min_i \|\vec{r} - \vec{s}_i\|^2$을 사용하기 위해 $\|\vec{r} - \vec{s}_i\|^2$을 모든 심볼에 대하여 계산한다.

$$\|\vec{r} - \vec{s}_0\|^2 = \|(2,\ 3) - (1,\ 1)\|^2 = \|(1,\ 2)\|^2 = 1 + 4 = 5$$

$$\|\vec{r} - \vec{s}_1\|^2 = \|(2,\ 3) - (-1,\ 1)\|^2 = \|(3,\ 2)\|^2 = 9 + 4 = 13$$

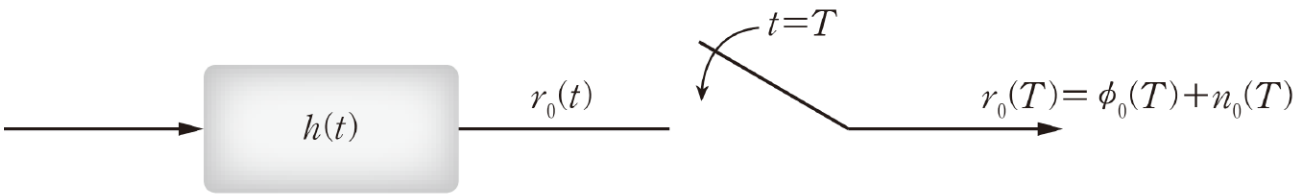
$$\|\vec{r} - \vec{s}_2\|^2 = \|(2,\ 3) - (-1,\ -1)\|^2 = \|(3,\ 4)\|^2 = 9 + 16 = 25$$

$$\|\vec{r} - \vec{s}_3\|^2 = \|(2,\ 3) - (1,\ -1)\|^2 = \|(1,\ 4)\|^2 = 1 + 16 = 17$$

따라서 $\min_i \|\vec{r} - \vec{s}_i\|^2 = 5$이다. $\|\vec{r} - \vec{s}_0\|^2 = 5$이므로 최소 거리 판정은 $\hat{m} = 0$ 이다.

10.3 정합 필터

10.3 정합 필터



[그림 10-7] 신호 성분과 잡음 성분이 있을 때 정합 필터의 구조

- **출력의 SNR**

$$\frac{\phi_0^2(T)}{E[n_0^2(T)]}$$

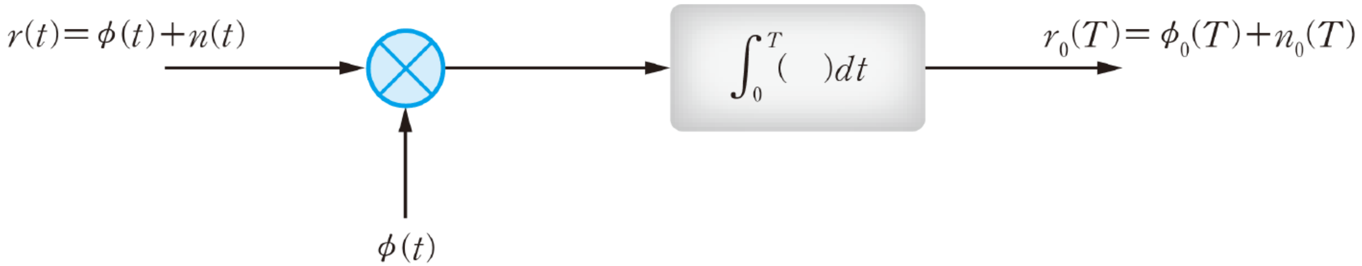
- **출력의 SNR을 최대화하는 *h(t)***

$$h(t)=\phi(T-t) \qquad (10.21)$$

10.3 정합 필터

$$r_0(T) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau)h(T-\tau)d\tau = \int_0^T r(\tau)h(T-\tau)d\tau$$

$$= \int_0^T r(\tau)\phi(\tau)\,d\tau = \langle r(t),\ \phi(t)\rangle \qquad (10.22)$$

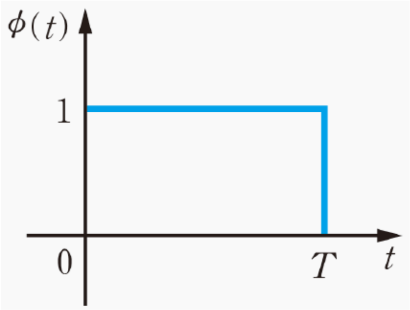


[그림 10-8] 정합 필터의 상관기 구현

10.3 정합 필터

예제 10-5

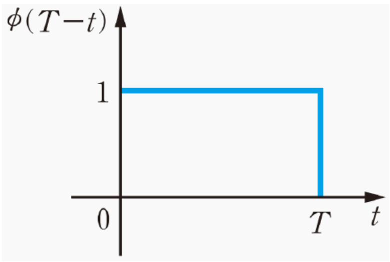
정합 필터의 입력 신호 가운데 신호 성분 $\phi(t)$가 [그림 10-9]와 같이 사각 펄스이다. 이때 정합 필터의 임펄스 응답 $h(t)$, 신호 성분 $\phi(t)$의 정합 필터 출력 $\phi_o(t)$를 그리시오.



[그림 10-9] 정합 필터의 입력 신호 가운데 신호 성분 $\phi(t)$

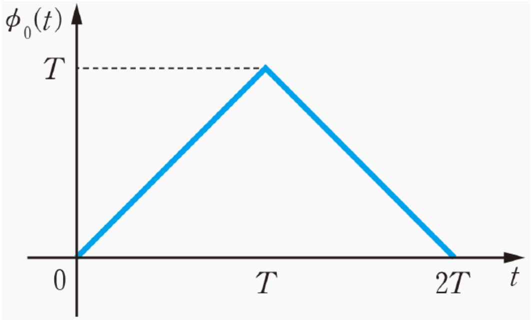
10.3 정합 필터

풀이



[그림 10-10] 정합 필터의 임펄스 응답 $h(t)=\phi(T-t)$

신호 성분 $\phi(t)$의 정합 필터 출력 $\phi_o(t)=\int_0^t \phi(\tau)\phi(t-\tau)d\tau$는 [그림 10-11]과 같다.



[그림 10-11] 신호 성분 $\phi(t)$의 정합 필터 출력 $\phi_o(t)=\int_0^t \phi(\tau)\phi(t-\tau)d\tau$

10.4 판정 경계와 합집합 상한

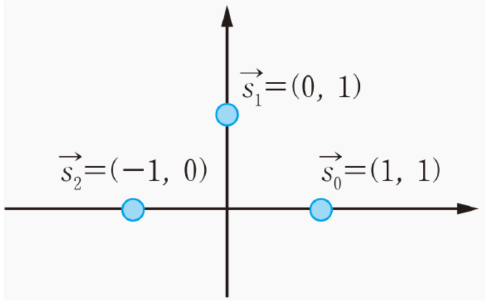
10.4 판정 경계와 합집합 상한

- **판정 경계**
  - 2차원 M진 변조의 경우에 신호 성상도에는 M개의 점이 찍히게 되는데, 이 각 점들을 거리가 가장 가까운 지역 M개로 나눌 때의 경계

10.4 판정 경계와 합집합 상한

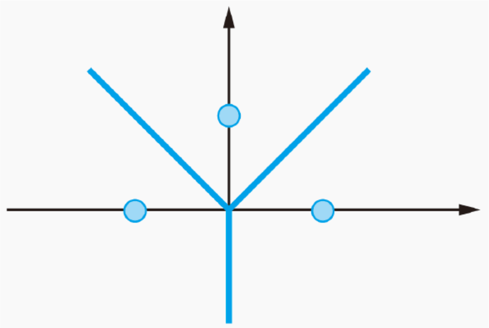
예제 10-6

[그림 10-12]와 같은 2차원 3진 변조의 신호 성상도가 있다. 최소 거리 판정을 한다고 할 때, 이 그림에 판정 경계를 그리시오.



[그림 10-12] 3진 변조의 신호 성상도의 예

풀이

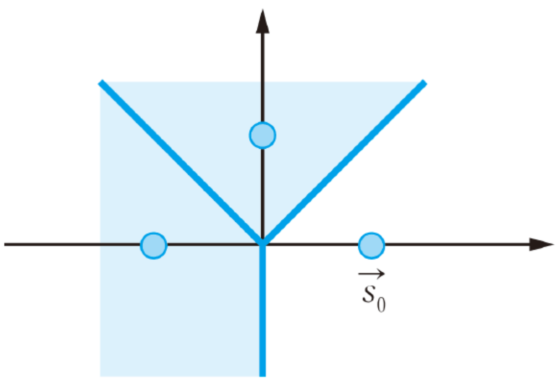


[그림 10-13] 3진 변조의 신호 성상도와 판정 경계

10.4 판정 경계와 합집합 상한

$$P_s = \frac{1}{M}\sum_{i=0}^{M-1} P(\text{오류}\,|\,i) \qquad (10.24)$$

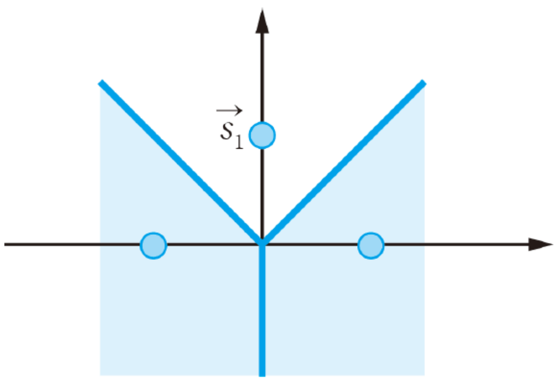
$P(\text{오류}\,|\,0)$은 $f_{\vec{R}|m}(\vec{r}\,|\,0) = \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\|\vec{r}-\vec{s}_0\|^2}{N_0}}$을 [그림 10−14]의 색칠한 부분에서 적분한 값이다.



[그림 10−14] 3진 변조에서 심볼 0을 보낼 때 판정 오류가 나는 수신 벡터의 영역

10.4 판정 경계와 합집합 상한

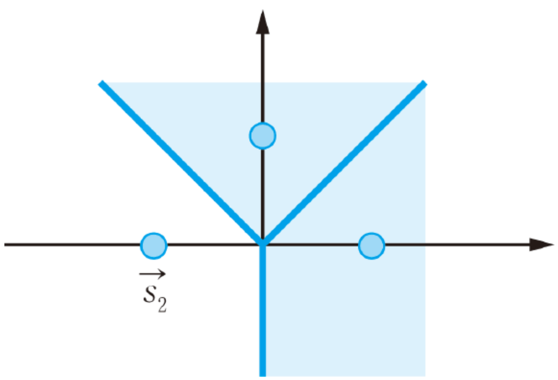
$P($오류$|1)$은 $f_{\vec{R}|m}(\vec{r}|1) = \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\| \vec{r} - \vec{s}_1 \|^2}{N_0}}$ 을 [그림 10−15]의 색칠한 부분에서 적분한 값이다.



[그림 10−15] 3진 변조에서 심볼 1을 보낼 때 판정 오류가 나는 수신 벡터의 영역

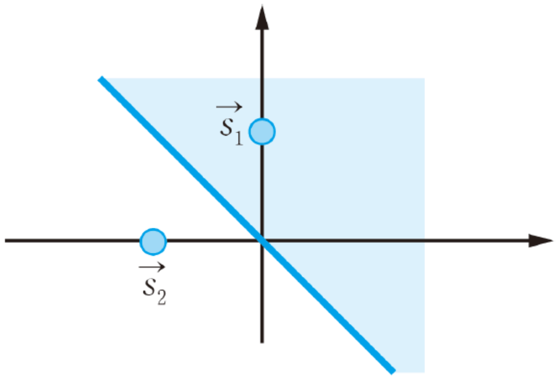
10.4 판정 경계와 합집합 상한

$P(\text{오류}\,|\,2)$는 $f_{\vec{R}|m}(\vec{r}\,|\,2) = \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\|\vec{r}-\vec{s}_2\|^2}{N_0}}$ 을 [그림 10-16]의 색칠한 부분에서 적분한 값이다.



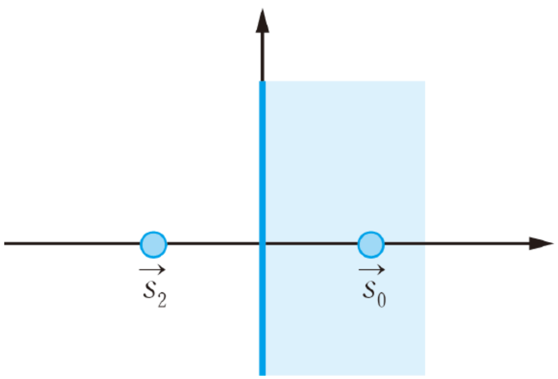
[그림 10-16] 3진 변조에서 심볼 2를 보낼 때 판정 오류가 나는 수신 벡터의 영역

10.4 판정 경계와 합집합 상한



$$P(A) = Q\left(\frac{\| \vec{s}_1 - \vec{s}_2 \|}{\sqrt{2N_0}}\right) \qquad (10.26)$$

[그림 10-17] 심볼 1, 심볼 2만 있다고 가정하고, 심볼 2를 보낼 때 심볼 1으로 판정 오류가 나는 수신 벡터의 영역



$$P(B) = Q\left(\frac{\| \vec{s}_0 - \vec{s}_2 \|}{\sqrt{2N_0}}\right) \qquad (10.27)$$

[그림 10-18] 심볼 0, 심볼 2만 있다고 가정하고, 심볼 2를 보낼 때 심볼 0으로 판정 오류가 나는 수신 벡터의 영역

10.4 판정 경계와 합집합 상한

$$P(\text{오류}|2) \le P(A)+P(B) = Q\left(\frac{\| \vec{s}_1 - \vec{s}_2 \|}{\sqrt{2N_0}}\right) + Q\left(\frac{\| \vec{s}_0 - \vec{s}_2 \|}{\sqrt{2N_0}}\right) \qquad (10.28)$$

★ 핵심 포인트 ★

- **판정 경계** : 2차원 M진 변조의 경우에 신호 성상도에는 M개의 점이 찍히게 되는데, 이 각 점들을 거리가 가장 가까운 지역 M개로 나눌 때의 경계

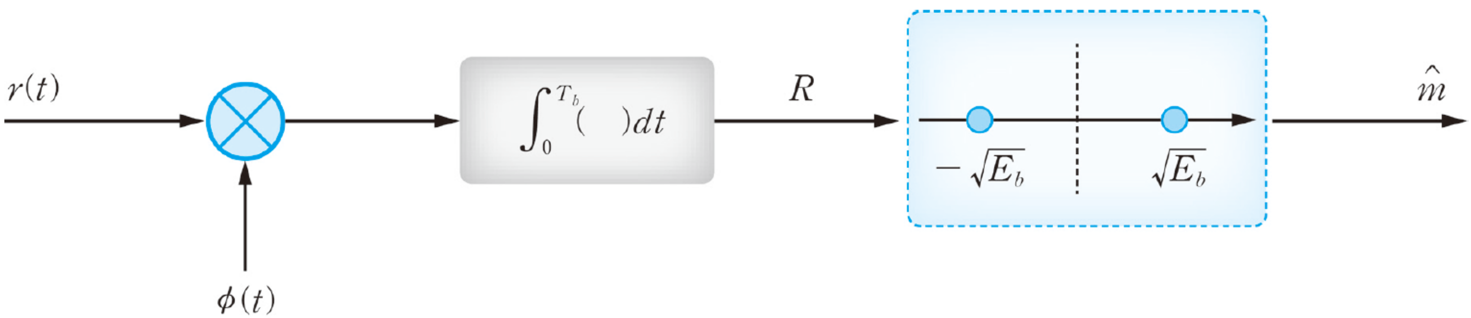
10.5 BPSK 복조

10.5 BPSK 복조

$$s_0(t) = -A\cos 2\pi f_c t \qquad s_1(t) = A\cos 2\pi f_c t$$

- **신호공간** $\{c_1 \cos 2\pi f_c t \mid c_1\text{은 실수}\}$
- **이 신호공간의 정규 직교 베이시스**

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

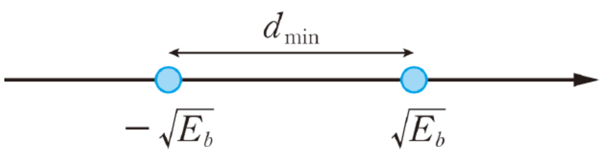


[그림 10-19] BPSK 수신단의 구조

10.5 BPSK 복조

- **Bit error rate (BER)**

$$P_b = \frac{1}{2}\{P(\text{오류}|0) + P(\text{오류}|1)\} \quad (10.30)$$



[그림 9-2] E_b를 이용한 BPSK의 신호 성상도

$$P_b = Q\left(\frac{d_{\min}}{\sqrt{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (10.31)$$

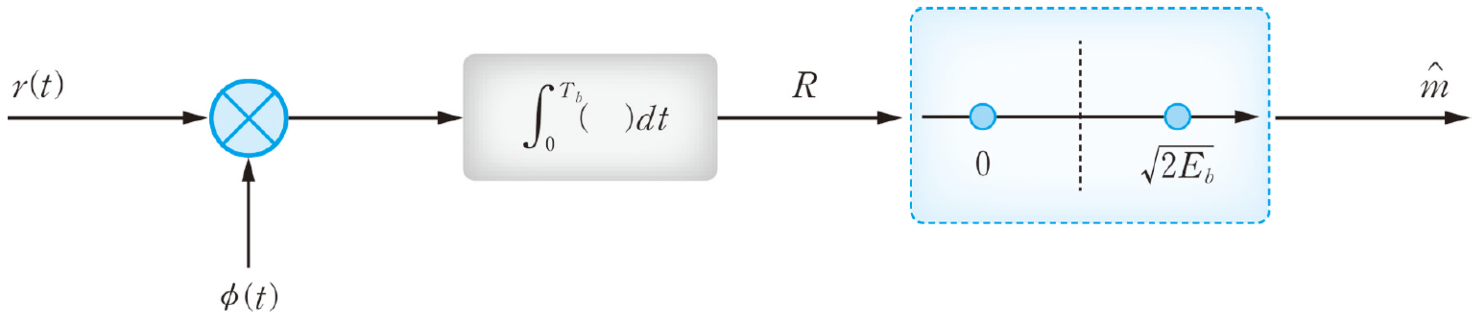
10.6 ASK 복조

10.6 ASK 복조

$$s_0(t) = 0, \quad s_1(t) = A\cos 2\pi f_c t$$

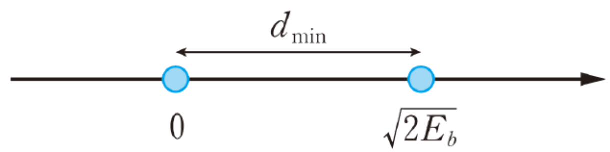
- **신호공간** $\{c_1 \cos 2\pi f_c t \mid c_1\text{은 실수}\}$
- **이 신호공간의 정규 직교 베이시스**

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



[그림 10-20] ASK 동기식 복조의 경우 수신단 구조

10.6 ASK 복조



[그림 9-4] E_b를 이용한 ASK의 신호 성상도

$$P_b = Q\left(\frac{d_{\min}}{\sqrt{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \tag{10.33}$$

- **ASK는 비동기식 복조도 가능하다.**

10.7 BFSK 복조

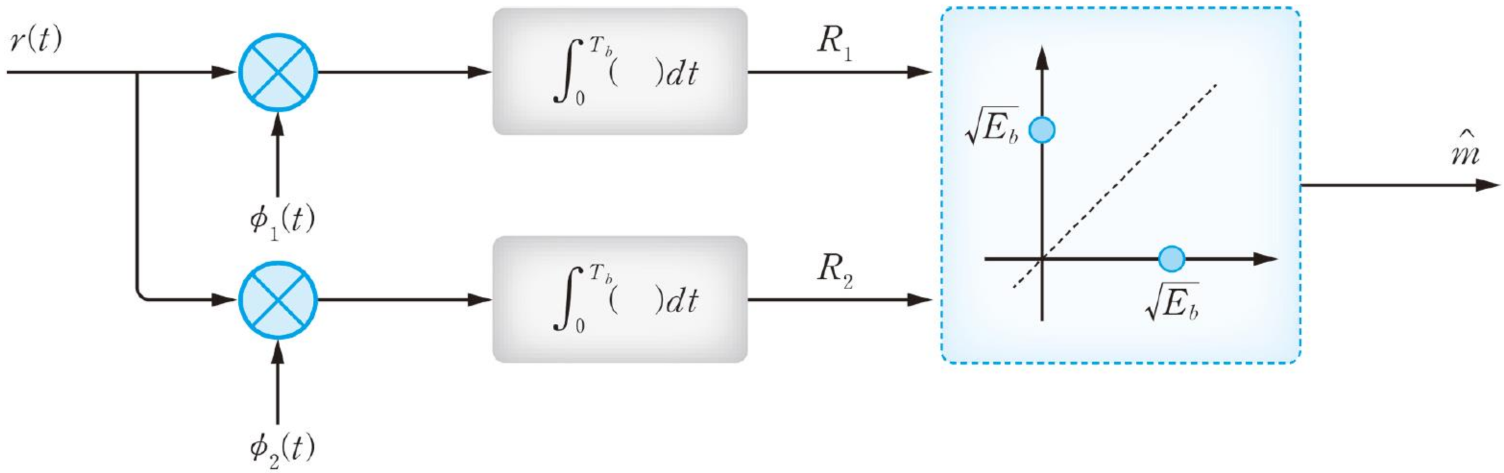
10.7 BFSK

$$s_0(t) = A\cos 2\pi f_0 t, \quad s_1(t) = A\cos 2\pi f_1 t$$

- **신호공간** $\{c_0 \cos 2\pi f_0 t + c_1 \cos 2\pi f_1 t \mid c_0,\ c_1\text{은 실수}\}$
- **이 신호공간의 정규 직교 베이시스**

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}}\cos 2\pi f_0 t,\ \ \phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}}\cos 2\pi f_1 t$$

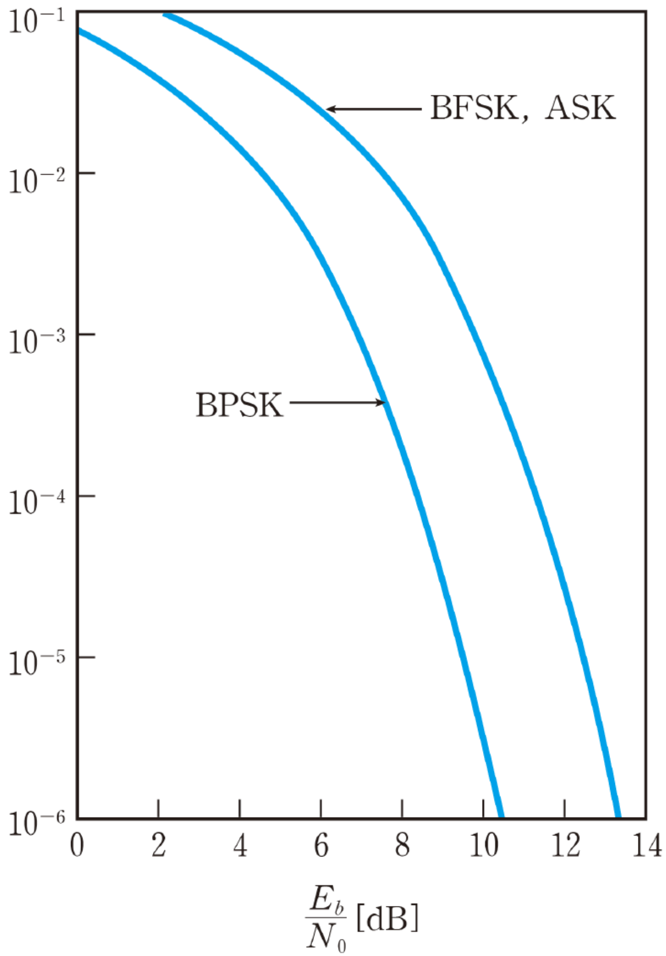
10.7 BFSK



[그림 10-21] BFSK 동기식 복조의 경우 수신단 구조

$$P_b = Q\left(\frac{d_{\min}}{\sqrt{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \tag{10.35}$$

10.7 BFSK



[그림 10-22] BPSK, ASK, BFSK의 BER P_b

10.7 BFSK

★ 핵심 포인트 ★

- BFSK 동기식 복조 : $R_1 = \int_0^{T_b} r(t)\phi_1(t)dt$, $R_2 = \int_0^{T_b} r(t)\phi_2(t)dt$를 구한 다음, 수신 벡터 (R_1, R_2)를 $\vec{s}_0 = (\sqrt{E_b}, 0)$, $\vec{s}_1 = (0, \sqrt{E_b})$와 비교하여 가까운 쪽으로 판정
- BFSK 동기식 복조의 BER : $P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$

10.8 MPSK 복조

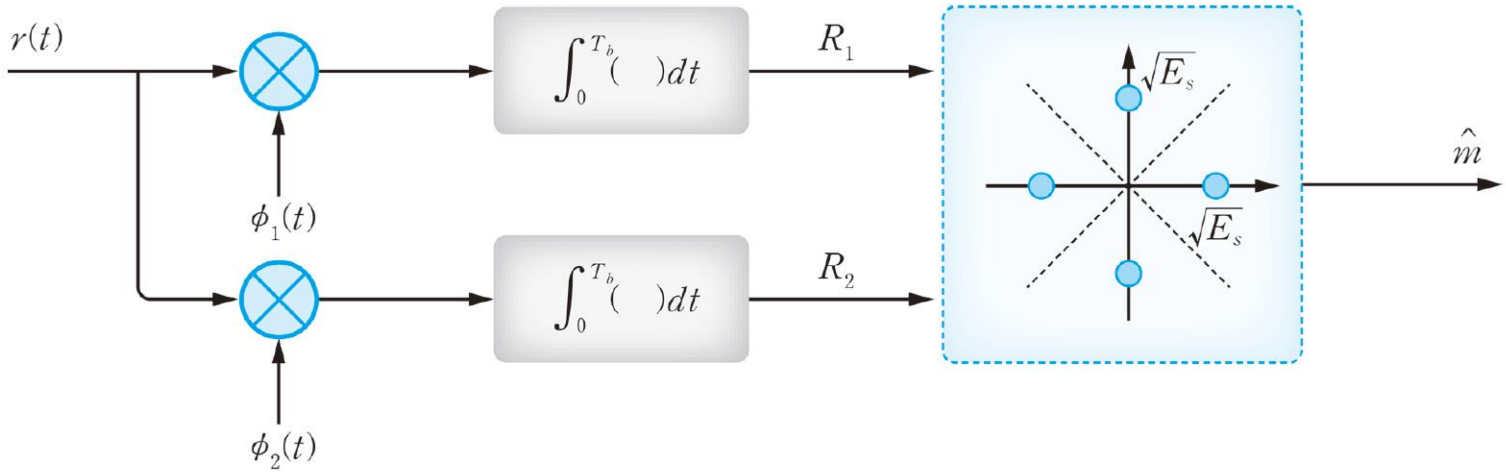
10.8 MPSK 복조

$$s_m(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}\right)$$
$$= \sqrt{E_s} \cos\frac{2\pi m}{M} \cdot \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t - \sqrt{E_s} \sin\frac{2\pi m}{M} \cdot \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$$

- **신호공간** $\{c_0 \cos 2\pi f_c t + c_1 \sin 2\pi f_c t \mid c_0, c_1 \text{은 실수}\}$
- **이 신호공간의 정규 직교 베이시스**

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t, \quad \phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$$

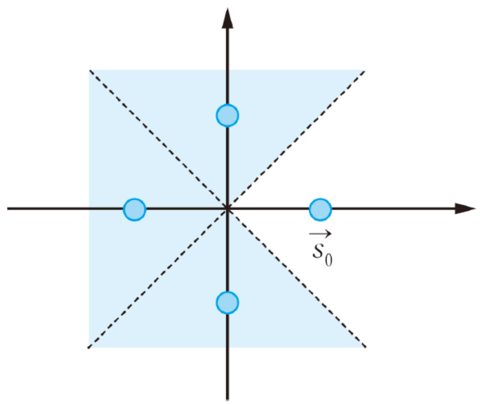
10.8 MPSK 복조



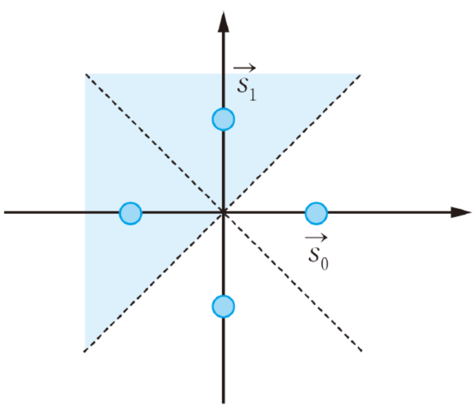
[그림 10-23] QPSK의 경우 수신단 구조($M=4$)

$$P_s = P(\text{오류}\,|\,0) \leq 2Q\left(\frac{d_{\min}}{\sqrt{2N_0}}\right) = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\sin\frac{\pi}{M}\right) \tag{10.37}$$

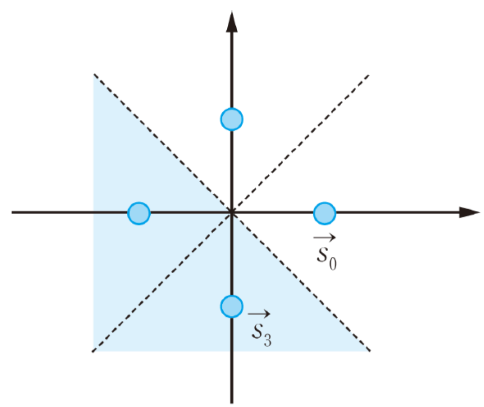
10.8 MPSK 복조



[그림 10-24] QPSK의 경우 $\vec{s}_0$를 보낼 때 판정 오류가 생기는 수신 벡터의 영역



[그림 10-25] $\vec{s}_0$와 $\vec{s}_1$만 있다고 가정하고 $\vec{s}_0$를 보낼 때 $\vec{s}_1$으로 판정 오류가 생기는 수신 벡터의 영역



[그림 10-26] $\vec{s}_0$와 $\vec{s}_3$만 있다고 가정하고 $\vec{s}_0$를 보낼 때 $\vec{s}_3$로 판정 오류가 생기는 수신 벡터의 영역

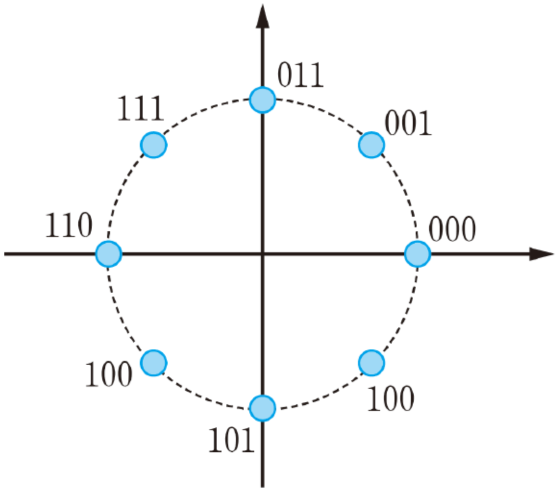
10.8 MPSK 복조

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) - Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) \quad (10.39)$$

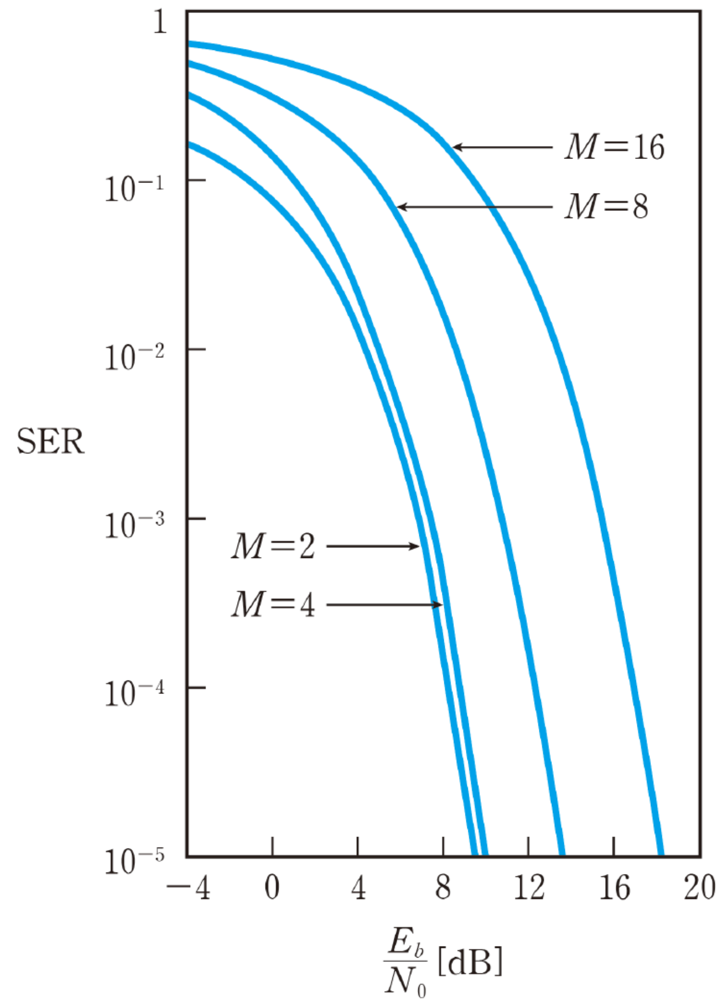
$$\begin{aligned} P_b &= \frac{\text{비트 오류 개수}}{\text{보낸 비트 개수}} \\ &= \frac{(1\text{에서 } \log_2 M \text{ 사이 숫자}) \cdot \text{심볼 오류 개수}}{\log_2 M \cdot \text{보낸 심볼 개수}} \end{aligned} \quad (10.40)$$

$$\frac{P_s}{\log_2 M} \le P_b \le P_s \quad (10.41)$$

10.8 MPSK 복조



[그림 10-27] 그레이 코딩된 8-PSK의 신호 성상도



[그림 10-28] MPSK의 SER P_s ($M = 2,\ 4,\ 8,\ 16$)

10.9 QAM 복조

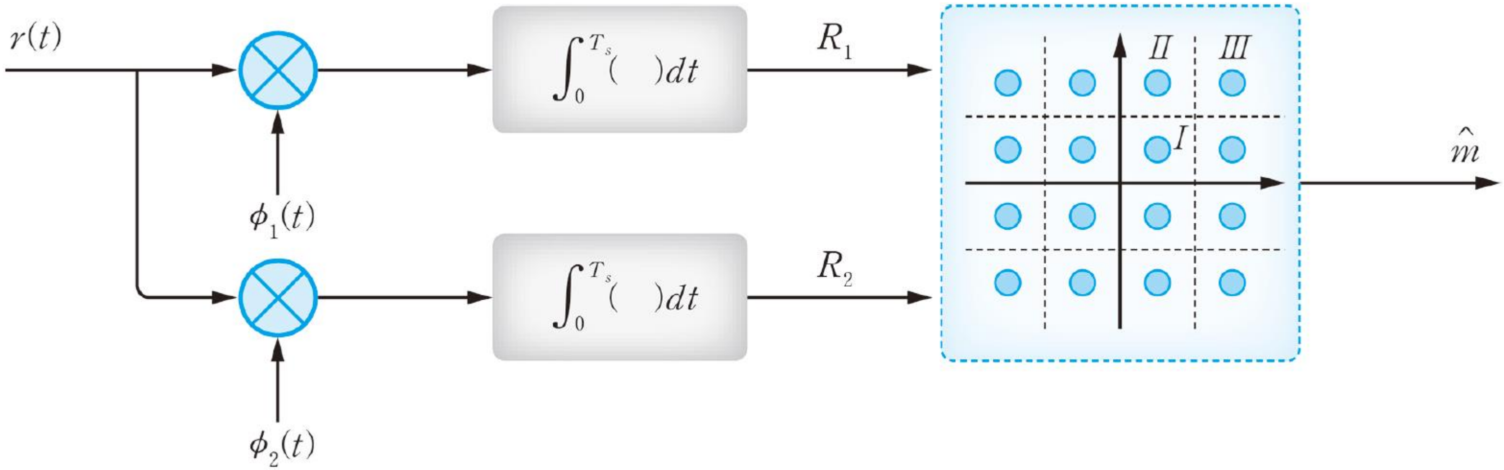
10.9 QAM 복조

$$s_m(t) = I_m \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t - Q_m \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$$

- 신호공간 $\{c_0 \cos 2\pi f_c t + c_1 \sin 2\pi f_c t \mid c_0,\ c_1 \text{은 실수}\}$
- 이 신호공간의 정규 직교 베이시스

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos 2\pi f_c t, \quad \phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin 2\pi f_c t$$

10.9 QAM 복조



[그림 10-29] 16-QAM의 수신단 구조

$$P(\text{오류}\,|\,I) = 4Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) - 4Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \le 4Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \qquad (10.43)$$

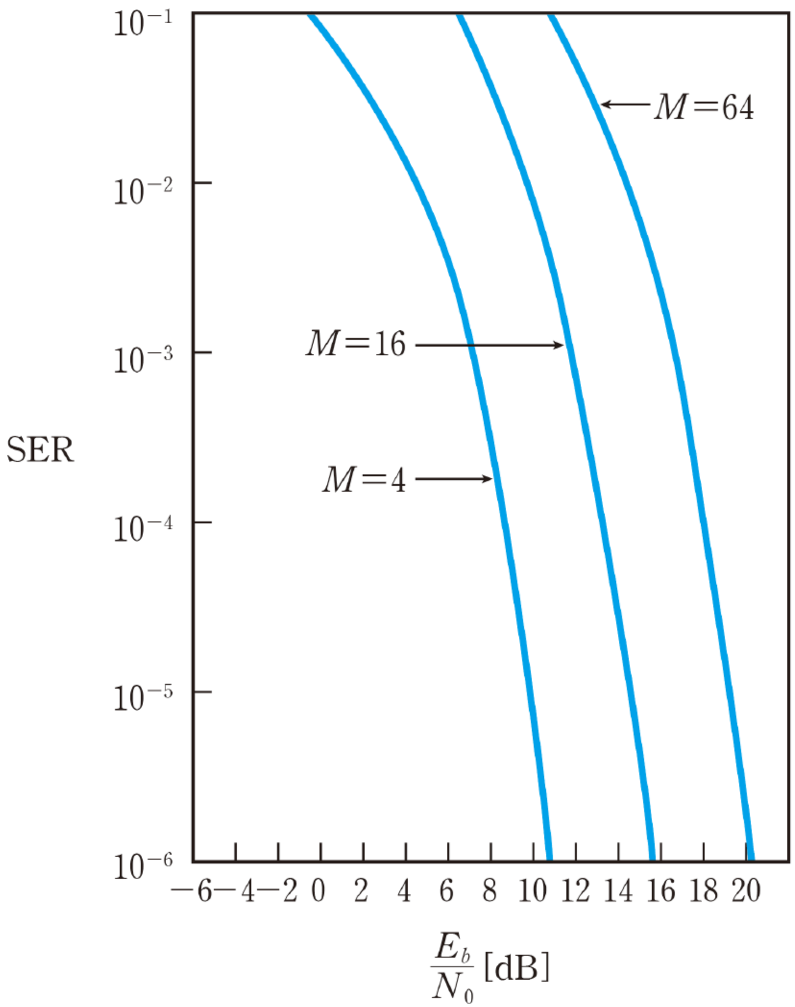
10.9 QAM 복조

$$P(\text{오류} \mid II) = 3Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) - 2Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \leq 3Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \qquad (10.44)$$

$$P(\text{오류} \mid III) = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) - Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \leq 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \qquad (10.45)$$

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{16}\{4P(\text{오류} \mid I) + 8P(\text{오류} \mid II) + 4P(\text{오류} \mid III)\} \\ &= 3Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) - \frac{9}{4}Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \leq 3Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{5N_0}}\right) \end{aligned} \qquad (10.46)$$

10.9 QAM 복조



[그림 10-30] QAM의 SER $P_s(M=4,\ 16,\ 64)$

Q & A

수고하셨습니다.