

GMSK 변조 방식의 LPI 성능 분석

LPI Performance Analysis of GMSK Modulation Scheme

유형만* · 정병기** · 유흥균*

Hyeong-Man Yu* · Byung-Ki Chung** · Heung-Gyoon Ryu*

요 약

NRZ 정보 신호의 기본적인 특징인 symbol rate를 검출하기 위해서는 비선형 특성을 갖는 DAM (Delay-And-Multiplier) 수신기를 이용한다. 검출 성능의 척도는 DAM 수신기 출력단에서 얻어지는 rate-line의 정규화된 SNR이 주로 사용되며, 비화 통신에서는 LPI(Low Probability of Intercept)를 위하여 이를 낮추어야 한다. 본 논문에서는 DAM 수신기에 대한 LPI 성능을 분석하기 위해 입력신호로 MSK 계열의 변조된 신호를 사용하였다. 특히, GSM 시스템에 사용되는 GMSK(BT = 0.3)을 중심으로 분석하였다. 결과적으로, 대역 효율이 우수한 GMSK 변조 방식이 BPSK, QPSK, OQPSK, 그리고 MSK 변조 방식과 비교하여 보다 좋은 LPI 성능을 갖는다. 분석의 공정성을 위하여 사용대역 내에서의 송신전력을 같게 하였다.

Abstract

The symbol rate which is the main feature of NRZ information signal is detected by DAM (Delay-And-Multiplier) receiver. It is important for secure communication to reduce the normalized output SNR which is calculated at the DAM output as a measure of detectability. In this paper, we use the signal which is modulated by the class of MSK modulation schemes as the input signal of the DAM receiver for analyzing LPI performance and the GMSK(BT=0.3) used in GSM system is highlighted. Consequently, GMSK which has better bandwidth efficiency than other modulation schemes(BPSK, QPSK, OQPSK, and MSK) has better LPI performance compared with other ones. To compare the performances of each modulation scheme fairly, the transmitted powers of each system are set to be same within useful bandwidth.

I. 서 론

상용 통신과는 달리 비화 통신에서는 의도적인 인터셉션(interception)에 의해 정보유출이 발생할 수 있으며, 이에 대처하기 위한 통신 기법으로써 인터셉션의 확률을 저하시키려는 연구(LPI:Low Probability of Intercept)가 있다. 일반적인 인터셉션 방법으로는 신호의 에너지를 검출하여 전송 유무를 판별하는 radiometer 방식, symbol rate line을 검출

하기 위한 DAM(Delay-And-Multiplier) 방식, 그리고 carrier를 검출하기 위한 frequency doubler 방식이 있다^[1]. [2]에서는 기저 대역 신호를 Nyquist pulse shaping 하여 DAM 검출기에서 발생된 rate line의 크기를 감소시켜 LPI 성능이 향상됨을 보였다. [3]에서는 채널 환경을 multipath로 하여 DAM 검출기의 성능을 보였는데, multipath가 있는 상황에서 보다 좋은 LPI 성능이 나타남을 보였다. [4]에서는 DAM 검출기의 입력 신호로써 BPSK와 OQPSK 변

* 충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

** 국방과학연구소, 위성체계 연구팀(Satellite System Research Team, Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20010212-019

· 수정완료일자 : 2001년 4월 11일

조 신호를 사용하여 LPI 성능을 분석하였다. 이 논문에서는 BPSK와 QPSK의 LPI 성능이 동일하며, OQPSK가 보다 좋은 LPI 성능을 가짐을 보였다. 그러나, DAM 출력에서 rate line을 나타내는 결과식에서 크기 정보만을 가져야 하는 OQPSK의 PSD (Power Spectral Density)가 위상정보를 포함한 형태로 표현되었고, BPSK와 QPSK의 성능 비교에 있어 심볼 당 에너지를 동일하게 하지 않고 분석하였다. 본 논문에서는 feature detector의 일종으로써, 디지털 변조된 신호의 symbol rate를 검출하는 DAM 수신기를 대상으로 한다^[5].

본 논문에서는 대역 효율이 BPSK나 QPSK에 비해 우수한 MSK 및 GMSK 방식의 LPI 성능을 비교 분석하였다. 분석된 GMSK 방식은 $BT=0.3$ 인 GSM 시스템에 사용되고 있는 방식이며, 변조 방식별 성능 비교를 공정하게 하기 위하여 DAM 수신기에서 입력되는 대상 신호의 수신 전력을 사용 대역 내에서 동일하게 하여 분석하였다.

II. 검출기 모델과 신호 해석^[4]

간단한 DAM 수신기는 그림 1과 같다. 이 수신기는 대역폭 W 를 갖는 전치 필터(BPF), 지연 소자, 곱셈기, 그리고 symbol rate line만을 검출하기에 충분히 작은 대역을 가진 대역 통과 필터로 이루어져 있다. 뒷 단의 대역 통과 필터는 정합 필터의 일종이며, 중심주파수가 rate line이 있는 주파수에 위치한다. 앞단의 전치 필터는 $f_s \pm W/2$ 의 차단 주파수를 갖는 이상적인 rectangular 대역 통과 전달 함수를 갖는다. 총 관측시간은 T 로 정의한다. DAM 수신기는 전치 필터의 대역 (W)과 지연 시간 (T_d)을 변화시켜 출력에서의 rate line 크기의 최대값을 찾고

자 한다. 성능 척도는 뒷 단의 대역 통과 필터의 출력에서 얻어지는 정규화된 SNR이다. 입력 신호로는 BPSK, QPSK, OQPSK, MSK, 그리고 GMSK 변조된 신호를 사용한다.

$$r(t) = s(t) + n(t) \tag{1}$$

$$s(t) = A \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p(t - kT_s) \tag{2}$$

식 (2)에서 $\{a_k\}$ 는 ± 1 의 값을 갖는 symbol sequences, $p(t)$ 는 단일 에너지를 갖는 pulse function, A 는 신호의 진폭, T_s 는 심볼 주기 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} r'(t) &= s'(t) + n'(t) \\ &= A \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p'(t - kT_s) + n'(t) \end{aligned} \tag{3}$$

$$y(t) = r'(t) r'^*(t - T_d) \tag{4}$$

정합 필터는 대역이 B 이고^[3], symbol rate에 중심을 둔 협대역 대역 통과 필터로 동작하므로, power spectrum의 관점에서 DAM 출력에서의 spectrum을 $S_y(f)$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$S_y(f) = S_s(f) + S_{s \times s}(f) + S_{s \times n}(f) + S_{n \times n}(f) \tag{5}$$

여기서 $S_s(f)$ 는 symbol rate의 이산적인 spectral line이고, $S_{s \times s}(f)$ 는 연속적인 spectrum이며, $S_{s \times n}(f)$ 는 신호×잡음에 의한 spectrum이고, $S_{n \times n}(f)$ 는 잡음×잡음에 의한 spectrum이다.

곱셈기의 출력 $y(t)$ 가 뒷 단의 정합필터를 통과하면, symbol rate에서 rate line이 발생된다. 이 필터의 대역 (B)을 충분히 작다고 가정하면, rate line과 관련된 이산적인 성분을 제외한 나머지 성분들은 일정한 값을 갖는 잡음성분이 된다. 그러므로, 출력 SNR은 다음과 같다.

$$SNR_o = \frac{S_s(f_s)}{B [S_{s \times s}(f_s) + S_{s \times n}(f_s) + S_{n \times n}(f_s)]} \tag{6}$$

입력 SNR과 정규화된 변수들은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\begin{aligned} \frac{A^2 T_s}{N_o} &= \frac{E_s}{N_o}, \\ B_n &= BT_c, \quad W_n = WT_s, \quad T_{dn} = T_d T_s \end{aligned} \tag{7}$$

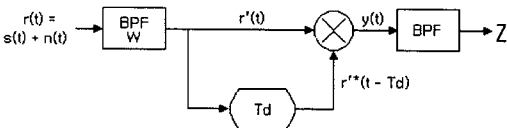


그림 1. Symbol rate 검출을 위한 DAM 수신기
Fig. 1. DAM receiver for symbol rate detection.

위의 정의를 이용하여 식 (6)을 정리하면 다음과 같다⁷⁾.

$$SNR_o = \left(\frac{E_s}{N_o} \right)^2 \frac{k_s}{B_n[k_{nn} + (E_s/N_o)k_{sn} + (E_s/N_o)^2k_{ss}]} \quad (8)$$

여기서 k_s, k_{ss}, k_{sn} , 그리고 k_{nn} 은 정규화된 spectrum coefficients이고, B_n 은 T_s 로 정규화된 대역이다. 일반적으로 DAM 수신기의 입력 SNR은 매우 낮으므로 식 (8)에서 k_{ss} 과 k_{sn} 은 무시된다.

$$SNR_o = \left(\frac{E_s}{N_o} \right)^2 \frac{k_s}{B_n[k_{nn}]} \quad (9)$$

여기서,

$$k_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left| Q\left(\frac{n}{T_s}; T_d\right) \right|^2 \cdot \delta\left(f - \frac{n}{T_s}\right) \quad (10)$$

$$k_{nn}(f) = \frac{WT_s}{2f_s^2} \left(1 - \frac{|f|}{2W} \right) \left\{ 1 + \sin c \left[4WT_d \left(1 - \frac{|f|}{2W} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

$$|Q(f; T_d)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} P(f+\lambda) \cdot P^*(\lambda) \cdot e^{-j2\pi\lambda T_d} d\lambda \right|^2 \quad (12)$$

따라서, LPI 성능 분석을 위해 사용된 정규화된 출력 SNR은 식 (9)로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{SNR_o B_n}{(E_s/N_o)^2} = \frac{k_s}{k_{nn}} \quad (13)$$

일반적으로, LPI 성능 분석에 대한 척도로써 DAM 수신기와 같은 인터셉터 출력에서의 출력 SNR이 사용되는데, 이 출력 SNR이 낮을수록 보다 좋은 LPI 성능을 얻는다고 볼 수 있다. 따라서, LPI를 위해서 송신기는 이 출력 SNR을 낮추기 위한 방법을 사용하여야 한다.

III. 변조 방식별 검출기 성능 분석

심볼 당 전송되는 에너지는 변조방식에 무관하게 일정하며, DAM 수신기에 입력되는 대상 신호의 수신전력이 사용대역 내에서 동일하다고 가정한다. 변조 방식에 따라 변화되는 부분은 식 (12)이다.

3-1 BPSK

BPSK인 경우 pulse function과 이의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$p(t) = \Pi\left(\frac{t}{T_b}\right), \quad T_b = T_s, \\ \mathcal{T}\left\{\Pi\left(\frac{t}{T_b}\right)\right\} = T_b \text{sinc}(T_b f) \quad (14)$$

$$|Q(f; T_d)|^2 = |\mathcal{T}\{p(t)p(t-T_d)\}|^2 \\ = T_s^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(T_s \lambda) \text{sinc}(T_s(f-\lambda)) e^{-j2\pi\lambda T_d} d\lambda \right|^2 \quad (15)$$

3-2 QPSK

QPSK인 경우 pulse function과 이의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Pi\left(\frac{t}{2T_b}\right) = a(t), \quad 2T_b = T_s, \\ \mathcal{T}\left\{\frac{1}{\sqrt{2}} \Pi\left(\frac{t}{T_s}\right)\right\} = \sqrt{2} T_b \text{sinc}(2T_b f) \quad (16)$$

$$|Q(f; T_d)|^2 = |\mathcal{T}\{p(t)p(t-T_d)\}|^2 \\ + |\mathcal{T}\left\{a\left(t - \frac{T_s}{2}\right)a\left(t - \frac{T_s}{2} - T_d\right)\right\}|^2 \\ = \frac{T_s^4}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(T_s \lambda) \text{sinc}(T_s(f-\lambda)) e^{-j2\pi\lambda T_d} d\lambda \right|^2 \quad (17)$$

3-3 OQPSK

OQPSK인 경우 pulse function과 이의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Pi\left(\frac{t}{2T_b}\right) = a\left(t - \frac{T_s}{2}\right), \quad 2T_b = T_s, \\ \mathcal{T}\left\{\frac{1}{\sqrt{2}} \Pi\left(\frac{t}{T_s}\right)\right\} = \sqrt{2} T_b \text{sinc}(2T_b f) \quad (18)$$

$$|Q(f; T_d)|^2 = |\mathcal{T}\{p(t)p(t-T_d)\}|^2 \\ + |\mathcal{T}\left\{a\left(t - \frac{T_s}{2}\right)a\left(t - \frac{T_s}{2} - T_d\right)\right\}|^2 \\ = \frac{T_s^4}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(T_s \lambda) \text{sinc}(T_s(f-\lambda)) e^{-j2\pi\lambda T_d} d\lambda \right|^2 \quad (19)$$

식 (15)와 식 (17)을 비교하면 QPSK가 BPSK의 1/2 크기이고, 식 (17)과 식 (19)를 비교해 보면 동일하다. 즉 QPSK와 OQPSK는 LPI 성능이 동일하며, BPSK보다는 LPI 성능이 3[dB] 유리하다.

3-4 MSK와 GMSK

MSK인 경우 pulse function과 이의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$p(t) = \cos\left(\frac{\pi t}{2T_b}\right) \Pi\left(\frac{t}{2T_b}\right) = q\left(t - \frac{T_s}{2}\right), \quad 2T_b = T_s,$$

$$\mathcal{F}\left\{\cos\left(\frac{\pi t}{2T_b}\right) \Pi\left(\frac{t}{2T_b}\right)\right\} = \frac{4T_b}{\pi} \frac{\cos(2\pi T_b f)}{1 - (4T_b f)^2}$$

$$= \frac{2T_s}{\pi} \frac{\cos(\pi T_s f)}{1 - (2T_s f)^2} \quad (20)$$

$$|Q(f; T_d)|^2 = |\mathcal{F}\{p(t)p(t - T_d)\}|^2$$

$$+ \left| \mathcal{F}\left\{q\left(t - \frac{T_s}{2}\right)q\left(t - \frac{T_s}{2} - T_d\right)\right\} \right|^2$$

$$= \frac{8 T_s^2}{\pi^2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\cos(\pi T_s \lambda)}{1 - (2T_s \lambda)^2} \right] \right.$$

$$\left. \left[\frac{\cos(\pi T_s (f - \lambda))}{1 - (2T_s (f - \lambda))^2} \right] e^{-j 2\pi \lambda T_d} d\lambda \right|^2 \quad (21)$$

GMSK인 경우에는 MSK에 사용된 pulse function 대신에 Gaussian filtering된 신호를 사용한다.

3-5 MSK에서 최적의 W_n 과 T_{dn}

BPSK, QPSK, 그리고 OQPSK인 경우에는 최적의 W_n 과 T_{dn} 은 각각 1.5와 0.5이다^{[3][4]}. 그러므로, 이 절에서는 MSK인 경우만을 고려하여 분석을 한다. GMSK인 경우는 MSK의 확장형이므로 MSK의 결과를 따른다.

그림 2와 3에서 최적의 W_n 과 T_{dn} 을 찾을 수 있다. 그림 2에서는 T_{dn} 에 대하여 $W_n=1.2$ 일 때, 그림 3에서 W_n 에 대하여 $T_{dn}=0.3$ 일 때 각각 정규화된 출력 SNR이 최대가 되므로 이 값들이 최적이라 할 수 있다.

IV. 수치 해석과 검토

지금까지 각 변조 방식별 DAM 수신기의 성능을

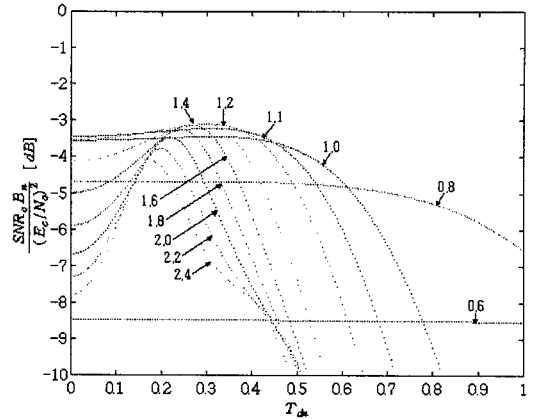


그림 2. W_n 의 최적화

Fig. 2. Optimization of W_n .

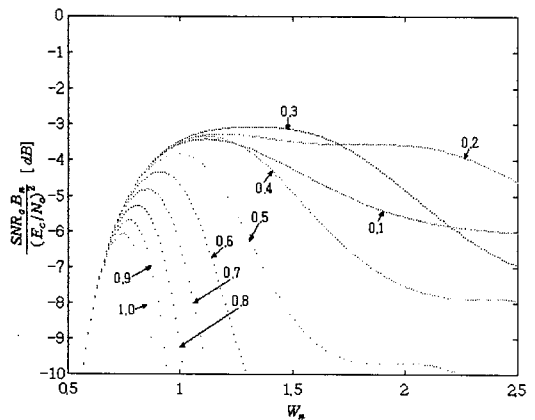


그림 3. T_{dn} 의 최적화

Fig. 3. Optimization of T_{dn} .

분석하였다. 이 절에서는 변조 방식별 최적의 W_n 과 T_{dn} 을 이용하여 정규화된 출력 SNR을 분석한다.

BPSK, QPSK, 그리고 OQPSK의 W_n 에 대한 정규화된 출력 SNR이 그림 4에 있다. 그림 5는 MSK와 여러 가지 Bandwidth-Time Product를 가진 GMSK의 W_n 에 대한 정규화된 출력 SNR을 나타낸다. GSM에서 사용되는 GMSK (BT=0.3)가 MSK에 비해 5[dB] 정도 우수하다. DAM 수신기 측면에서 살펴보면, BPSK, QPSK나 OQPSK인 경우 출력 SNR의 최대점과 비교하여 1[dB] 이내에서 $0.8 \leq W_n \leq 2.3$

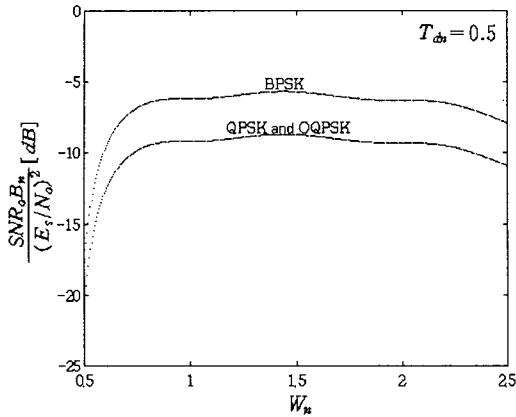


그림 4. W_n 에 대한 정규화된 출력 SNR
 Fig. 4. W_n versus normalized output SNR
 (for BPSK, QPSK, and OQPSK, $T_{dn}=0.5$).

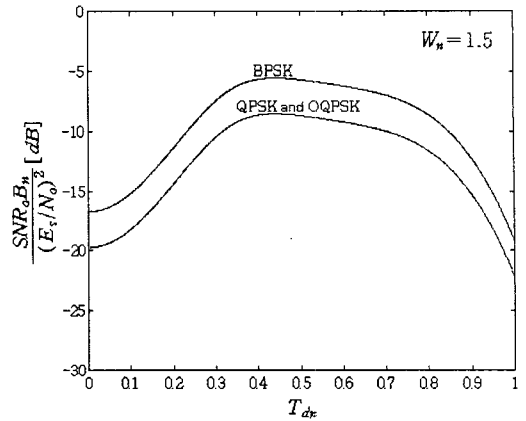


그림 6. T_{dn} 에 대한 정규화된 출력 SNR
 Fig. 6. T_{dn} versus normalized output SNR
 (for BPSK, QPSK and OQPSK, $W_n=1.5$).

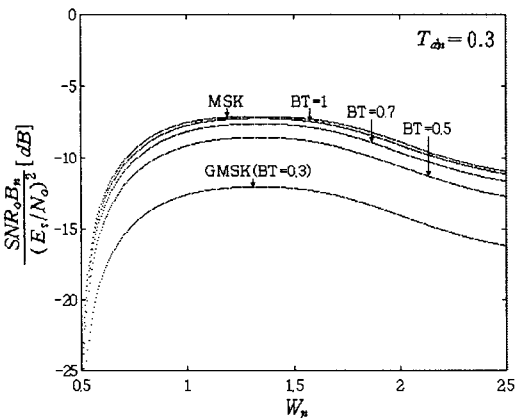


그림 5. W_n 에 대한 정규화된 출력 SNR
 Fig. 5. W_n versus normalized output SNR
 (for MSK and GMSK, $T_{dn}=0.3$).

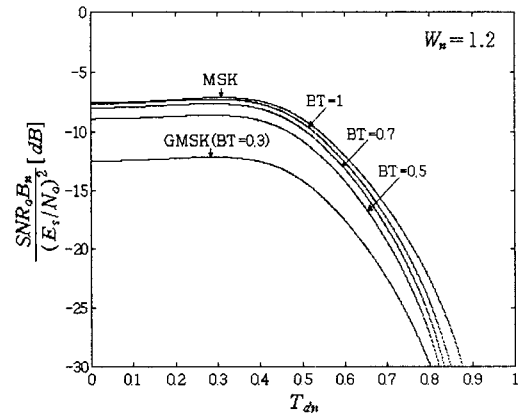


그림 7. T_{dn} 에 대한 정규화된 출력 SNR
 Fig. 7. T_{dn} versus normalized output SNR
 (for MSK and GMSK, $W_n=1.2$).

의 구간을 갖는 반면, MSK나 GMSK인 경우에는 $0.9 \leq W_n \leq 1.8$ 의 구간을 갖는다. 즉, MSK 계열의 경우 DAM 수신기는 전치 필터의 대역을 최적화 하기가 PSK 계열의 경우에 비해 어려움을 볼 수 있다. 또한, GSM에서 사용되는 BT=0.3인 GMSK가 정규화된 전치 필터의 대역의 관점에서 볼 때 가장 좋은 LPI 성능을 보인다.

그림 6과 그림 7은 BPSK, QPSK, 그리고 OQPSK

의 T_{dn} 에 대한 성능 분석과 MSK와 GMSK의 T_{dn} 에 대한 성능 분석을 각각 나타낸다. 그림 6을 살펴보면 출력 SNR의 최대점과 비교하여 1 [dB] 이내가 $0.3 \leq T_{dn} \leq 0.7$ 의 구간인 반면, 그림 7을 살펴보면 $0 \leq T_{dn} \leq 0.4$ 의 구간을 갖는다. 즉, DAM 수신기의 지연 시간을 최적화 하는 것은 PSK 계열이나 MSK 계열 두 부류의 변조 방식에서 서로 비슷하다. 또한, 여기서도 정규화된 지연시간의 관점에서 볼 때

GMSK(BT=0.3)가 가장 좋은 LPI 성능을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 PSK 계열과 MSK 계열의 변조방식에 따라 DAM 수신기에 대한 symbol rate spectral line의 검출 성능을 분석하였다. MSK 계열의 경우 DAM 수신기에서 지연시간 (T_d)을 최적화 하는 것은 PSK 계열과 비슷한 반면, 전치필터 대역 (W)을 최적화 하는 것은 PSK 계열 보다 어려움을 볼 수 있다. 즉, MSK 계열의 경우 DAM 수신기에 의한 symbol rate 검출이 PSK 계열에 비해 어렵다는 것이다. 또한, GSM 시스템에서 사용되고 있는 변조 방식인 GMSK(BT=0.3)는 PSK 계열과 MSK에 비하여 정규화된 출력 SNR이 전반적으로 낮음을 볼 수 있었다. 즉, 가장 좋은 LPI 성능을 보이고 있다. 따라서, 대역 효율과 LPI 측면에서 PSK 계열 보다는 MSK 계열, 특히 GMSK(BT=0.3)가 비화 통신에 적합하다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. A. Gardner, "Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, pp. 897-906, Aug., 1988.
- [2] D. E. Reed and M. A. Wickert, "Minimization

of Detection of Baud Rate Spectral Lines by Delay and Multiply Receivers," *Proceedings of Milcom'86*, Monterey, CA, October, 6-8, 1986.

- [3] M. A. Wickert, W. C. Staton, "The effect of multipath on the detection of symbol-rate spectral lines by delay and multiply receivers" *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol. 10 3, pp. 545-549, April, 1992.
- [4] D. E. Reed and M. A. Wickert, "Symbol rate detectability of filtered OQPSK by a delay and multiply receiver" *Computers and Communications, Conference Proceedings.*, pp. 174-178, 1988.
- [5] J. Imbeaux, "Performances of the Delay-Line Multiplier Circuit for Clock and Carrier Synchronization in Digital Satellite Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol. SAC-1, no. 1, pp. 82-95, January, 1983.
- [6] C. W. Helstrom, "Distribution of the Filtered Output of a Quadratic Rectifier Computed by Numerical Contour Integration," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-16, pp. 450-63, July, 1986.
- [7] R. E. Ziemer, R. L. Peterson, D. E. Borth, *Digital Communications and Spread Spectrum Systems*. New York: Macmillian, 1985.

유 형 만

2000년 2월: 충북대학교 전자공학(공학사)
2000년 3월~현재: 충북대학교 전공학과 석사과정

유 흥 균

1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수

정 병 기

서울시립대학교 전자공학과(공학사, 공학석사)
충북대학교 전자공학과 박사과정수료
국방과학연구소 선임연구원 재직