

Chirped BPSK 시스템의 항재밍 성능 분석

Anti-Jamming Performance Analysis of Chirped BPSK System

유형만* · 윤성렬* · 정병기** · 김용로*** · 유흥균*

Hyeong-Man Yu* · Sung-Ryul Yun* · Byung-Ki Chung** ·
Yong-Ro Kim*** · Heung-Gyoon Ryu*

요 약

본 논문에서는 비화 통신을 위하여 chirp 방식을 이용한 BPSK 시스템의 LPI(low probability of intercept)와 AJ(anti jamming) 성능을 분석하였다. Chirp 방식은 주파수를 전체 확산대역 내에서 임의적으로 변화시켜 신호의 주기적인 특성을 제거하기 때문에, feature parameter인 chip rate를 검출하는데 용이한 DAM(delay and multiplier)과 반송파 주파수 검출에 용이한 SC(squaring circuit)에 대항하여 뛰어난 LPI 특성을 가진다. chirp parameter의 변화에 따른 LPI 특성으로 chirp duration(T_c)이 커질수록 좋은 LPI 성능을 보인다. PBNJ(partial band noise jammer)환경에서, chirp 방식이 이른적인 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식에 비하여 AJ 성능이 우수함을 시뮬레이션으로 확인하였다. PBNJ와 MTJ(multi-tone jammer)를 비교하였을 때, chirped BPSK 시스템이 동일 JSR(jammer to signal power ratio)에서 MTJ에 더 우수한 AJ 성능이 있다.

Abstract

In this paper, LPI(low probability of intercept) and AJ(anti jamming) performance of the chirped BPSK system are analyzed. In the chirp method, the cyclostationary of the signal is eliminated, since the instantaneous frequency is varied randomly within the whole spread bandwidth. Therefore, chirp method is considered for good LPI system against DAM(delay-and-multiplier) or SC (squaring circuit) interceptor which detects the chip rate or carrier frequency. Longer chirp duration makes the LPI performance better. From the simulation results, the chirp method has better AJ performance than DS(direct sequence) system in the PBNJ(partial band noise jammer) channel. At the same JSR(jammer to signal power ratio) level, chirped BPSK system has more robust AJ performance against MTJ(multi-tone jammer) than PBNJ.

I. 서 론

비화 통신에서는 LPI와 AJ 기능을 모두 갖는 전송 신호 파형이 필요하다. LPI 성능을 향상시키기 위한 많은 연구가 있었는데, 그중 하나는 송신되는 신호에 heavy filtering을 가하는 방법이다^[1]. 그러나, 이 방

법은 동기를 얻는데 있어 수신기가 인터셉터와 동일한 어려움을 갖는 단점이 있다. 다른 방식은 chip rate의 feature가 발생되지 않도록 timing jitter를 이용하는 것이다^[2]. 이 방식에서는 신호 수신을 위해서 매우 정확한 동기를 필요로 하는 단점이 있다. 마지막으로 신호의 cyclostationary 특성을 제거하여 chip rate에서

* 충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electronic Engineering and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

** 국방과학연구소 위성체계연구팀(Research Team of Satellite System, Agency for Defense Development)

*** 문경대학 정보통신과(Dept. of Information and Communication, Munkyeong College)

· 논문 번호 : 20010609-073

· 수정완료일자 : 2001년 7월 18일

의 spectral line을 없애는 chirp 방식이 있다.

이 세 가지 방식 중에서 chirp 방식이 가장 좋은 LPI 성능을 보인다^[3]. Chirp 방식은 심각한 간섭과 다중 경로 페이딩 환경 하에서 매우 강인한 특성을 가진다. 또한, DSSS 시스템을 구현하기 위해서는 고속의 DSP가 필요하게 되어 매우 복잡한 반면, chirp 방식은 간단한 아날로그 하드웨어나 SAW (surface acoustic wave) 필터를 이용하여 쉽게 구현이 가능하기 때문에 간단하며, 전력 소비가 적다^[4]. DS/BPSK 신호는 SC(squaring circuit)나 DAM (delay-and-multiplier)에 의해 인터셉션을 당했을 경우 출력에서 두 배의 반송파 주파수와 chip rate의 harmonic 성분에서 spectral line이 발생하게 된다. 그러므로 쉽게 정보가 검출되게 된다. 그러나 chirp 방식을 사용하면 인터셉터 수신기에서 spectral line이 생성이 안 된다. chirp 신호의 featureless 특성을 이용하여 신호의 cyclostationary 특성이 제거되었기 때문이다. 따라서, chirp 방식을 사용하면 인터셉터에서 어떠한 feature도 검출할 수 없기 때문에 종전의 DSSS 방식보다 LPI 특성이 월등히 우수하다. 그러나, DSSS는 다수의 사용자가 동일 주파수를 사용하는 반면 chirp 방식은 신호 사이에 최소한의 frequency overlapping을 하므로 대역 효율이 낮은 단점을 가지고 있다^[5]. 본 논문에서는 기존의 우수한 LPI 특성을 갖는 chirp 방식을 기본으로 하여 chirp parameter 변화에 따른 LPI 성능 변화와 AJ 성능을 새롭게 연구하였다. 분석에 사용된 재머는 잡음재머(NJ:noise jammer)와 MTJ이다. 잡음재머에서는 fractional ratio의 변화에 따라서 부분대역 및 전대역 잡음재머로서 동작되는 경우를 분석하였고, 다중톤 재머에서는 톤 수의 변화에 따라서 특성 변화를 연구하였다.

II. Chirped BPSK 시스템

chirped BPSK 시스템은 그림 1과 같이 BPSK 변조기와 chirp parameter인 a , T_c 의 chirp filter로 구성할 수 있다. T_b 의 비트 주기를 갖는 정보 data를 입력으로 하는 chirp filter의 impulse response는 다음과 같다.

$$h(t) = \exp\left[-\pi\left(\frac{t}{T_c}\right)^2\right] \cos\left[2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} a t^2\right)\right] \quad (1)$$

여기서 T_c 는 chirp duration이고, a 는 frequency sweep slope이며, f_c 는 $t=0$ 에서의 반송파 주파수이다. 식(1)의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$H(f) = \frac{(1-j)}{\sqrt{2a}} \exp\left[\frac{-\pi(f+f_c)^2}{(aT_c)^2}\right] \exp\left[\frac{+j\pi(f+f_c)^2}{a}\right] + \frac{(1+j)}{\sqrt{2a}} \exp\left[\frac{-\pi(f-f_c)^2}{(aT_c)^2}\right] \exp\left[\frac{-j\pi(f-f_c)^2}{a}\right] \quad (2)$$

식 (1)의 순시 주파수는 다음과 같다.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} a t^2 \right) \right] = a t + f_c \quad (3)$$

여기서 $-T_c < t < T_c$ 이다.

이때의 frequency sweep slope는 다음과 같다.

$$\text{Frequency sweep slope} = \frac{df_i}{dt} = a$$

이때, $a > 0$ 일 때를 up-chirp, $a < 0$ 일 때를 down-chirp이라 한다.

시스템 대역폭은 순시 주파수의 범위로 정의된다.

$$B = 2|a|T_c, \quad -T_c < t < T_c \quad (4)$$

Chirp 방식의 aT_c 의 크기에 의해 송신되는 주파수 대역이 확산된다. 처리이득은 $PG = aT_c/f_s$ 이다. 수신기에서의 dechirping 과정에서, dechirp 신호의 impulse response에 사용된 frequency sweep slope은 송신기에서 사용된 chirp 신호의 frequency sweep slope에 반대되는 기울기를 갖는다. Chirp 신호를 matched filtering 하면, 이 때의 matched filter 출력 $g(t)$ 는 다음과 같다.

$$g(t) = h^*(t) * s(t) \quad (5)$$

여기서 $h^*(t)$ 는 수신기에서의 dechirping에 사용된 dechirp 신호의 impulse response이고, $s(t)$ 는 송신 신호이다.

$$g(t) = \sqrt{BT_c} \frac{\sin\left\{\pi B t \left(1 - \frac{|t|}{T_c}\right)\right\}}{\pi B t} \cos(2\pi f_c t), \quad \text{여기서 } -T_c < t < T_c \quad (6)$$

식 (6)의 envelope는 $t=0$ 일 때 최대이다.

Ⅲ. 중계기별 LPI 성능 분석

그림 1은 chirp 방식의 LPI 성능을 분석하기 위한 송신기와 인터셉터의 구성도이다^{[3],[5]}. T_d 는 인터셉터에서 조절 가능한 변수로써, 지연 시간을 의미한다. T_d 가 0인 경우 SC로 동작하고 T_d 가 0이 아닌 경우 DAM으로 동작한다.

SC 방식은 송신 신호의 반송파 주파수를 검출하기 위한 방법이고, DAM은 송신 신호의 심볼 레이

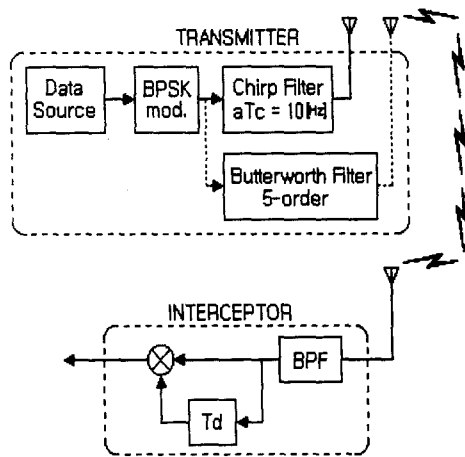


그림 1. LPI 성능 분석을 위한 구성도

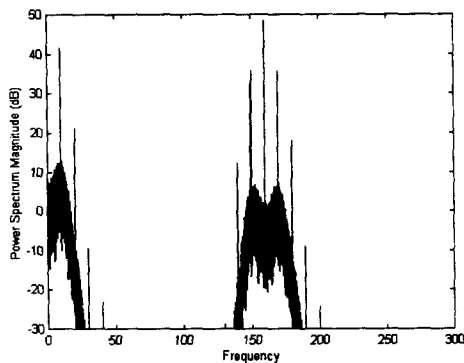


그림 2. 인터셉터의 출력 PSD (송신기에서 chirp 방식이 아닌 경우)

트를 검출하기 위한 방법이다. Butterworth filtering 한 송신신호의 전력과 chirp 송신신호의 전력은 동일하다. Chirp 방식의 LPI 성능을 알아보기 위하여, 반송파 주파수와 심볼 레이트를 각각 80 [Hz]와 10 [Hz]로 가정하였다. 또한, 처리이득 $PG = aT_d/f_s = 1$ 이다. 즉, 편의상 unit하다고 가정한다.

그림 2은 chirp 방식이 아닌 5차 Butterworth filtering된 송신신호가 인터셉터의 SC를 통과했을 때의 PSD (Power Spectrum Density)이다. Spectral line은 $f = 2f_c$ 와 data rate(10 Hz)의 harmonics에서 나타난다.

그림 3은 chirp filtering된 송신신호가 SC를 통과했을 때의 PSD로서 어떠한 spectral line도 나타나지 않는다.

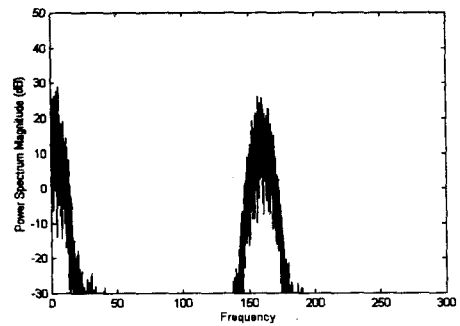


그림 3. 인터셉터의 출력 PSD (Chirp 송신 출력인 경우)

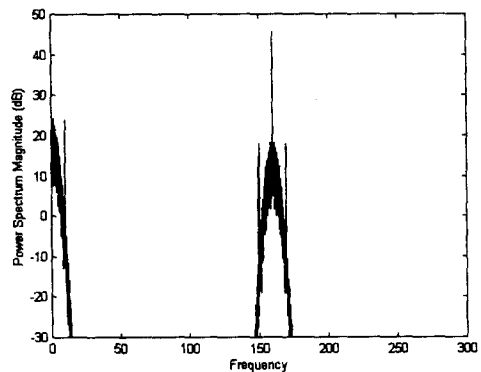


그림 4. Dechirping 후의 출력 PSD

그림 4는 chirp duration(T_c)과 frequency sweep slope(a)를 알고 있는 수신기가 신호를 dechirping 한 후 SC를 통과한 신호의 PSD이다. $f=2f_c$ 와 data rate의 harmonics에서 spectral line이 나타난다. 그러나, 이는 그림 2에 나타난 spectral line에 비해 $f=2f_c$ 에서는 약 3 dB, data rate의 harmonics에서는 약 17 dB 정도 낮은 크기이다. 즉, LPI 성능은 크게 향상되었지만, 수신측에서 약간의 동기 손실이 있다. 그림 5는 $T_c=0.5$ 인 DAM 경우로 인터셉터의 출력 PSD이다. 그림 3과 마찬가지로 chirp 송신 출력일 때 인터셉터에서 spectrum line이 검출되지 않는다.

그림 6은 chirp parameter T_c 를 변화시킬 때 인터셉터의 출력 PSD를 나타낸다. $aT_c=10$ [Hz]로 고정이며 T_c 가 $2T_b$, $4T_b$, $8T_b$ 로 변하는 경우이다.

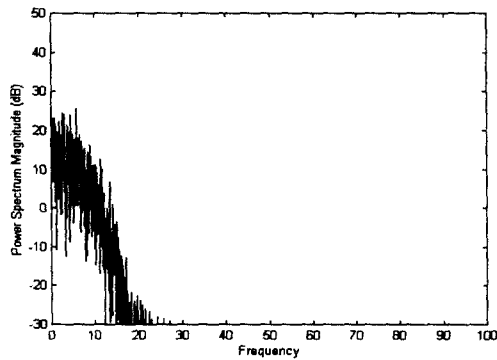


그림 5. $T_c=0.5$ 인 DAM의 경우로 인터셉터의 출력 PSD (Chirp 송신 출력인 경우)

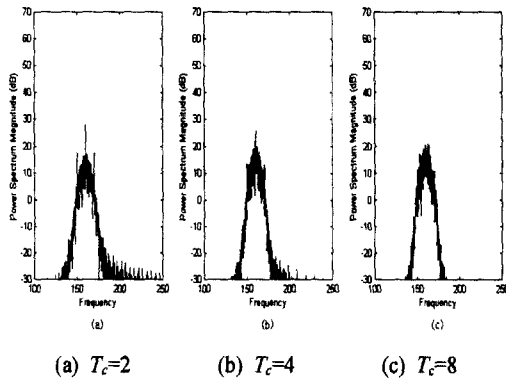


그림 6. T_c 변화에 따른 인터셉터의 출력 PSD

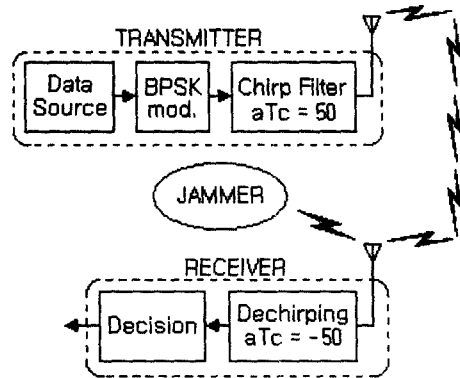


그림 7. AJ 성능 분석을 위한 블럭 구성도

그림에서 spectrum line의 크기는 $T_c=2T_b$ 인 경우 11.9 dB, $T_c=4T_b$ 인 경우 5.7 dB이고 $T_c=8T_b$ 인 경우 spectrum line이 나타나지 않는다. T_c 가 커짐에 따라 인터셉터의 출력 spectrum line은 작아진다. 즉 LPI 성능이 좋아진다.

IV. AJ 성능 분석

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 변조 방식은 chirp방식의 BPSK이며, 이때 T_b 는 0.1 [sec], 심볼 레이트(f_s)는 10 [Hz], 반송파 주파수(f_c)는 80 [Hz], chirp duration (T_c)은 $16T_b$, frequency sweep slope(a)는 32.15, 그리고 처리 이득은 $aT_c/f_s=50/f_s=5$ 이다. 그림 7은 chirp 방식의 AJ 성능을 분석하기 위한 시스템 구성도이다. 분석에 사용된 재머는 NJ, MTJ이다.

4-1 Noise jammer

그림 8은 반송파 주파수를 중심으로 3 dB의 JSR을 갖는 전대역재머($\rho=1$)와 부분대역($\rho=0.8, 0.6, 0.4, 0.2$)에 대해서 처리 이득이 5인 chirped BPSK 시스템의 시뮬레이션 BER 성능 결과와 동일한 JSR과 처리이득을 갖는 DS/BPSK 시스템의 BER 분석 결과이다. 점선(---)은 chirped BPSK 시스템의 시뮬레이션 특성 결과이며, 실선(—)은 식 (7)로 나타나

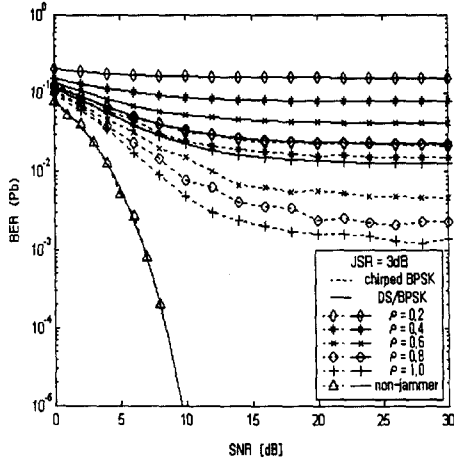


그림 8. 노이즈 재머에서 chirped BPSK 방식과 DS/BPSK 방식의 AJ 성능 비교 ($G_p=5$)

는 이론적인 수치해석 결과이다. PBNJ가 있는 환경에서 DS/BPSK의 BER은 다음과 같다^[6].

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o + 2N_J}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2\frac{E_b}{N_o}}{1 + 2\frac{J}{S}\frac{E_b}{N_o}\frac{1}{G_p}\frac{1}{\rho}}}\right) \quad (7)$$

E_b/N_o 과 J/S 는 수신단에서 출력 SNR과 재밍 전력 대 신호 전력의 비를 각각 나타내고, G_p 와 ρ 는 처리 이득과 재머의 fractional ratio를 나타낸다. 여기서 사용한 노이즈 재머는 chirped BPSK 시스템의 반송파 주파수를 중심으로 ρ 에 따라 노이즈 재머의 대역이 변화한다.

그림 8에서 보듯이 chirped BPSK 시스템의 성능이 우수하다. 예로써, $\rho=1$ 이고 SNR이 10 dB인 경우 DS/BPSK 시스템의 BER은 2.26×10^{-2} 인 반면, chirped BPSK 시스템의 BER은 4.9×10^{-3} 이다. 따라서, PBNJ 환경 하에서 chirp 방식의 시스템이 DS 방식의 시스템 보다 AJ 성능이 우수하다.

4-2 Tone jammer

그림 9는 chirped BPSK 시스템의 톤 재머에 대한

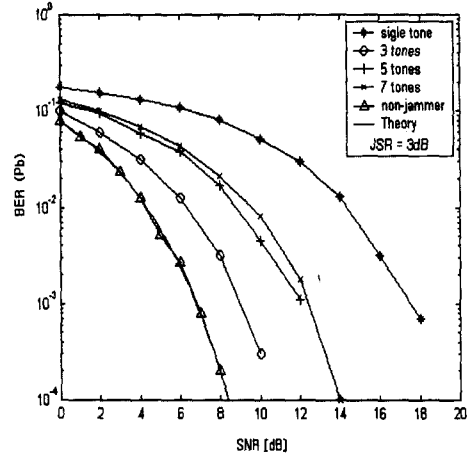


그림 9. MTJ 환경에서 Chirped BPSK 시스템의 AJ 성능 비교 ($G_p=5$)

AJ 성능을 분석한 것이다. JSR이 3 dB인 단일 TJ와 MTJ(M=3, 5, 7개)가 사용되었다. 사용된 톤 재머는 반송파 주파수를 기준으로 위치하며, 전체 스펙트럼 대역에 등간격으로 분포된 것으로 가정하였다. 그림에서 보면 재머가 없고 AWGN(additive white Gaussian noise)만 있는 환경에서 chirped BPSK 시스템은 이론적인 BPSK 시스템의 BER곡선과 일치한다. 톤재머 환경에서 시뮬레이션의 결과로 10^{-2} 을 만족하기 위한 요구 SNR은 단일 톤재머인 경우 14.4 dB, MTJ(M=3)인 경우 6.5 dB, MTJ(M=5)인 경우 8.7 dB, 그리고 MTJ (M=7)인 경우 9.6 dB이다. 결과적으로 단일 톤 재머인 경우에 가장 큰 BER, 즉 가장 낮은 AJ 성능을 보인다. 그것은 재머가 스펙트럼 대역의 중심에 위치할 때 전송 신호의 손실이 크게 된다는 의미이다.

그림 8과 비교할 때 노이즈 재머가 톤 재머보다 동일 JSR에서 통신 성능을 저하시킨다. 이는 확산 대역내에 순시주파수가 임의로 변하는 chirp 방식의 고유특성으로 인해 톤재밍인 경우, 노이즈재밍보다 송신신호에 재밍 가할 확률이 낮아지기 때문이다.

V. 결 론

chirped BPSK 시스템에 대한 LPI 및 AJ 성능을

연구하여 다음의 결과를 얻었다.

첫째로, chirp parameter인 T_c 에 의해 LPI 특성이 결정된다. T_c 가 작은 경우에 인터셉터의 출력에서 spectrum line이 검출되지만 T_c 가 큰 경우에 인터셉터의 출력에서 spectrum line이 검출되지 않는다. 연구 결과에서 chirp parameter T_c 가 $8 T_b$ 이상일 때 좋은 LPI 특성을 얻는다.

둘째로, chirp 방식이 DS 방식보다 우수한 AJ 성능을 가진다. 본 논문에서 시뮬레이션 결과로 chirped BPSK 시스템이 노이즈 재머 환경에서 이론적인 DS/BPSK 시스템보다 AJ 성능이 우수함을 보였다.

마지막으로, 동일 JSR에서 노이즈 재머와 톤 재머를 비교하였을 경우에, chirp 방식은 노이즈 재머인 경우 통신 성능이 저하되는 반면, MTJ에 대해서는 비교적 우수한 AJ 성능이 있다.

참 고 문 헌

[1] D. E. Reed, M. A. Wickert, "Minimization of Detection of Symbol Rate Spectral Lines by Delay and Multiply Receivers", *IEEE Transactions on*

Comm., vol. 36, no. 1, pp. 118-120, January 1988.
 [2] *LPI Waveform Study, SAIC Final Report*, Chapter 3, Contract F30602- 87-D-0184, July 1989.
 [3] Larry Lam, "The Symmetry in A Chirp Filter And Its Application to LPI Communication", *MILCOM '90, Conference Record, A New Era*, vol. 1 pp. 193-196, 1990.
 [4] J. Q. Pinkney, A. B. Sesay, S. Nechols and R. Behn, "A Robust High Speed Indoor Wireless Communications System using Chirp Spread Spectrum", *IEEE Canadian Conference*, vol. 1, pp. 84-89, 1999.
 [5] J. R. Yoo, "LPI Waveform Shaping by Modified Chirp Filter", *MILCOM' 92, Conference Record. Communications*, vol. 3, pp. 1231-1235, 1992.
 [6] R. L. Peterson, R. E. Ziemer and D. E. Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications*, Prentice-Hall, 1995.

유 형 만

2000년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [관심분야] 디지털 통신, 위성통신 시스템, AJ/LPI

정 병 기

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

윤 성 렬

2001년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [관심분야] 디지털 통신, 스펙트럼 확산통신 시스템, OFDM 통신 시스템

김 용 로

충북대학교 전자공학과 (공학사, 공학석사)
 충북대학교 전자공학과 박사과정수료
 문경대학 정보통신과 교수

유 흥 균

1988년 2월~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 [관심분야] 디지털 통신공학, 이동/위성통신 시스템, 스펙트럼 확산통신 시스템, 통신회로설계 및 통신 신호처리