

Chirp 방식의 LPI 및 AJ 성능 분석

Performance Analysis of AJ and LPI in Chirp Modulation System

유 흥 균*
Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 chirp 변조를 이용한 통신 시스템의 LPI(low probability of intercept)와 AJ(anti-jamming) 성능을 분석하였다. 인터셉터에 DAM(delay and multiplier)과 SC(squaring circuit)가 이용된 경우 CBPSK(Chirped BPSK)의 LPI 성능을 분석하였다. 스펙트럼 확산 방식의 CBPSK와 DS/BPSK 시스템에 대한 AJ 성능을 비교 분석 및 주파수 호핑 방식의 FH/CBFSK(Chirped BFSK)와 FH/BFSK, 그리고 FH/BCM(Binary Chirp Modulation) 시스템에 대한 AJ 성능을 분석하였다. LPI 결과로, CBPSK(Chirped BPSK)은 chirp 변수인 chirp 주기(T_c)가 커질수록 좋은 LPI 성능을 보인다. AJ 결과로, PBNJ(partial band noise jammer)환경에서 CBPSK 방식이 DS/BPSK 방식에 비하여 AJ 성능이 우수하고, 마찬가지로 FH/CBFSK 방식이 FH/BFSK 방식에 비하여 AJ 성능이 우수함을 시뮬레이션으로 확인하였다.

1. 서 론

비화 통신에서는 LPI와 AJ 성능을 모두 가지고 있는 전송 신호 파형이 필요하다. Chirp 방식은 신호의 cyclostationary 특성을 제거함으로써 chip rate에 서의 spectral line을 제거하여 좋은 LPI 성능을 보인다^[1]. Chirp 방식은 심각한 간섭과 다중 경로 페이딩 환경 하에서 매우 강인한 특성을 가진다. 또한, DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 시스템을 구현하기 위해서는 DSP가 필요하게 되어 매우 복잡한 반면, chirp 방식은 간단한 아날로그 하드웨

어나 SAW(surface acoustic wave) 필터를 이용하여 쉽게 구현이 가능하기 때문에 간단하며, 전력 소비가 적다^[2].

대역 확산 방식의 DS/BPSK 시스템은 SC나 DAM에 의해 인터셉션을 당했을 경우 출력에서 두 배의 반송파 주파수와 chip rate의 harmonic 성분에서 spectral line이 발생하게 된다. 그러나 CBPSK 방식을 사용하면 인터셉터 수신기에서 spectral line이 생성이 안된다. 이는 CBPSK 신호의 cyclostationary 특성이 제거되었기 때문이다. Chirp 신호는 featureless한 특성을 가지고 있다. 따라서, CBPSK 방식을 사용하면 인터셉터에서 어떠한 feature도 검출할 수 없기 때문에 종전의 DS/BPSK 방식보다 LPI 특성이 월등

* 충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소

히 우수하다. 그러나, DS/BPSK는 다수의 사용자가 동일 주파수를 사용하는 반면 chirp 방식은 신호 사이에 최소한의 frequency overlapping을 하므로 대역 효율이 낮은 단점을 가지고 있다^[3]. 본 논문에서는 LPI 특성을 갖는 CBPSK 시스템의 chirp parameter 변화에 따른 LPI 성능을 연구하였다. 또한 chirp 변조를 이용한 시스템의 AJ 성능을 연구하였다. 예로, PBNJ 환경에서 대역 확산 방식의 CBPSK와 DS/BPSK 시스템의 AJ 성능 분석과 주파수 호핑 방식의 FH/CBFSK와 FH/BFSK, 그리고 FH/BCM 시스템의 AJ 성능을 분석하였다.

II. Chirp 변조를 이용한 시스템

1. CBPSK 시스템

정보 data를 입력으로 하는 chirp filter의 impulse response은 다음과 같다. 그리고 CBPSK 시스템은 그림 3과 같이 BPSK 변조기와 chirp parameter인 a , T_c 의 chirp filter로 구성할 수 있다.

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

여기서 T_c 는 chirp duration이고, a 는 frequency sweep slope이다. f_c 는 $t=0$ 에서의 반송파 주파수이다.

식 (1)의 순시 주파수는 다음과 같다.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} a t^2 \right) \right] = a t + f_c, \quad \text{where, } -T_c < t < T_c \quad (2)$$

Frequency sweep slope의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Frequency sweep slope} = \frac{df_i}{dt} = a \quad (3)$$

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.

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

식(6)의 envelope는 $t=0$ 일 때 최대를 가진다.

2. FH/CBFSK과 FH/BCM 시스템

2.1 FH/CBFSK 시스템

FH/CBFSK 시스템은 기본적인 FH/BFSK 시스템과 동일하다^[6]. CBFSK의 chirp 변조는 FSK 스펙트럼의 null-to-null 대역과 동일하게 주파수 sweep을 하므로, chirp에 의한 스펙트럼 확산 효과는 없다. CBFSK의 이진 신호는 다음과 같다.

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left(f_{c1}t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (7)$$

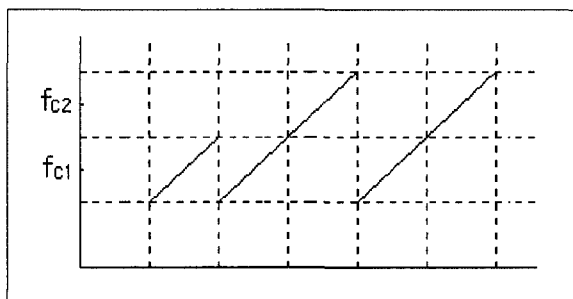
$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left(f_{c2}t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (8)$$

where, $-T_c/2 \leq t \leq T_c/2$

여기서 E_s 는 심볼 에너지이고, T_s 는 심볼 주기 ($T_s = T_b$)이고, T_c 는 chirp 주기이다. 이때 a 는 $2/T_c^2$ 이다.

그림 1은 CBFSK의 순시주파수를 나타낸다. 순시주파수(f_i)는 f_{c1} 또는 f_{c2} 를 중심으로 $2/T_c$ 대역을 이동한다. 따라서 CBFSK의 대역(W_B)는 BFSK의 대역과 동일하다.

주파수 호핑 FH/CBFSK 시스템은 $T_b = T_h$ 인



[그림 1] CBFSK의 순시주파수

fast 주파수 호핑이며, 송신 신호는 다음과 같다.

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left((f_{c1} + i_h \Delta f)t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (9)$$

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left((f_{c2} + i_h \Delta f)t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (10)$$

여기서 호핑 레벨 i_h 의 값은 PN code 발생기의 출력 n 비트로 결정되며, 주파수 호핑 패턴은 $N = 2^n - 1$ 개이다. 이때 $i_h = 0, 1, \dots, N-1$ 이다. 주파수 합성기에서 총 대역 W_{SS} 내로 호핑하며, W_{SS} 는 NW_B 이다. 이때, 처리이득은 $G_p = W_{SS}/W_B$ 이다.

수신기에서 신호를 복조하기 위해 송신기에 사용한 chirp filter와 대응되는, 즉 반대의 frequency sweep slope를 가지는 matched chirp filter에 의해 복조된다.

2.2 FH/BCM 시스템

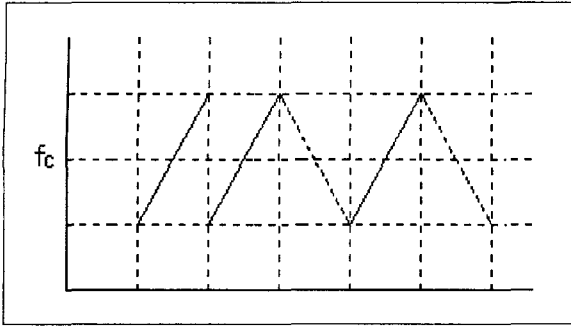
BCM의 1과 0의 정보 data는 up-chirp 또는 down-chirp로 대응된다. BCM 신호의 표현은 다음과 같다.

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left(f_{c1}t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (11)$$

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left(f_{c1}t - \frac{1}{2}at^2\right)\right) \quad (12)$$

where, $-T_c/2 \leq t \leq T_c/2$

여기서 E_s 는 심볼 에너지이고, T_s 는 심볼 주기 ($T_s = T_b$)이고, T_c 는 chirp 주기이다. 이때 a 는



[그림 2] BCM의 순시주파수

$4/T_c$ 이다. 그림 2는 BCM의 순시주파수를 나타낸다. 이때, 순시주파수(f_i)는 f_c 를 중심으로 $4/T_c$ 대역을 이동한다. 따라서 BCM의 대역은 BFSK와 동일하다.

주파수 호핑 FH/BCM 시스템은 $T_b = T_h$ 인 fast 주파수 호핑이다. 주파수 호핑 신호의 발생은 FH/CBFSK와 동일하며, FH/BCM의 신호는 다음과 같다.

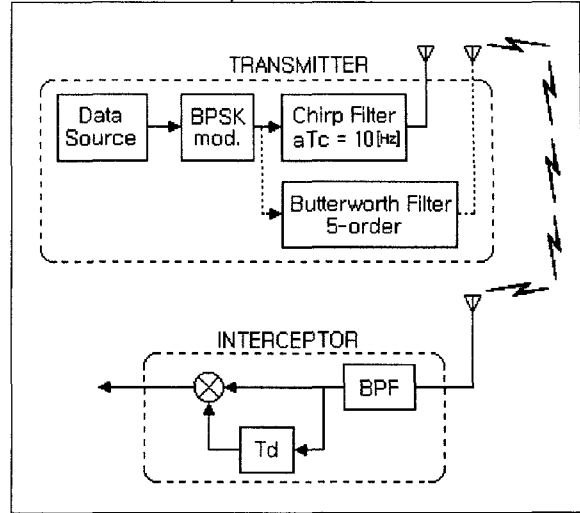
$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left((f_c + i_h \Delta f)t + \frac{1}{2} a t^2\right)\right) \quad (13)$$

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi\left((f_c + i_h \Delta f)t - \frac{1}{2} a t^2\right)\right) \quad (14)$$

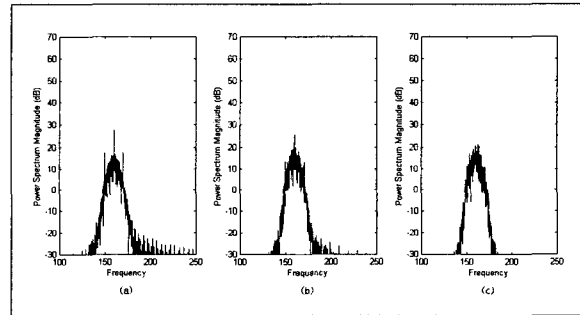
수신기에서 신호를 복조하기 위해 송신기에 사용한 up-chirp 또는 down-chirp filter와 대응되는, 즉 반대의 frequency sweep slope를 가지는 matched chirp filter에 의해 복조된다.

III. CBPSK의 LPI 성능 분석

그림 3은 chirp 방식의 LPI 성능을 분석하기 위한



[그림 3] LPI 성능 분석을 위한 블럭구성도



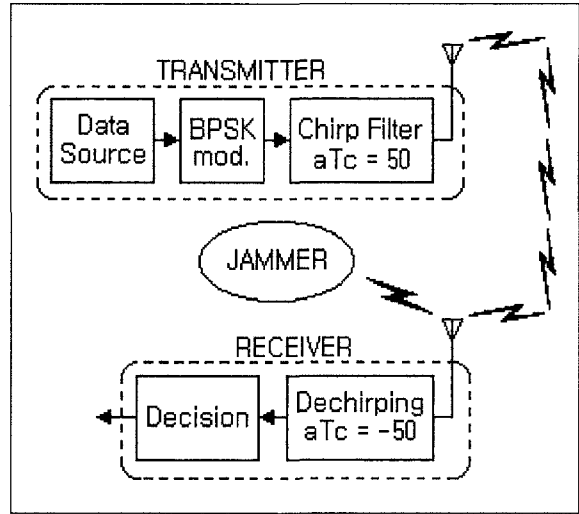
(a) $T_c=2$ (b) $T_c=4$ (c) $T_c=8$

[그림 4] T_c 변화에 따른 인터셉터에서 출력 PSD

송신기와 인터셉터의 구성도이다^[1,3]. 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 레이트를 검출하기 위한 방법이다. Butterworth filtering한 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, 처리이득을 편의상 unit하다고 가정한다. 즉, $PG = aT_c/f_s = 1$ 이다.

그림 4은 chirp parameter T_c 를 변화시킬 때 인터셉터의 출력 PSD를 나타낸다. $aT_c = 10$ [Hz]로 고정이고, T_c 가 $2T_b$, $4T_b$, $8T_b$ 로 변하는 경우이다. 그림에서 spectrum line의 크기는 $T_c = 2T_b$ 인 경우 11.9dB, $T_c = 4T_b$ 인 경우 5.7dB이고 $T_c = 8T_b$ 인 경우 spectrum line이 나타나지 않는다. T_c 가 커짐에 따라 인터셉터의 출력 spectrum line은 작아진다. 즉 LPI 성능이 좋아진다.



[그림 5] CBPSK 시스템의 AJ 성능 분석을 위한 블록 구성도

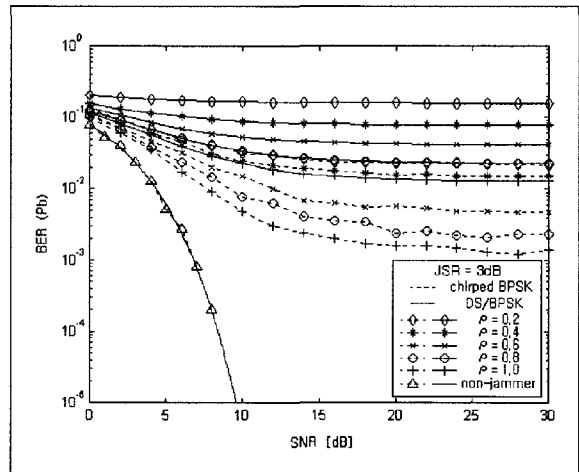
IV. AJ 성능 분석

1. CBPSK 시스템의 AJ 성능 분석

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

1.1 Noise jammer

그림 6은 반송파 주파수를 중심으로 3dB의 JSR을 갖는 전대역재머($\rho = 1$)와 부분대역($\rho = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$)에 대해서 처리 이득이 5인 CBPSK 시스템의 시뮬레이션 BER 성능 결과와 동일한 JSR과 처리이득을 갖는 DS/BPSK 시스템의 BER 분석 결과이다.



[그림 6] PBNJ에서 CBPSK 방식과 DS/BPSK 방식의 AJ 성능 곡선 ($G_p=5$)

점선(---)은 CBPSK 시스템의 시뮬레이션 특성 결과이며, 실선(—)은 식 (15)로 나타나는 이론적인 결과이다.

PBNJ가 있는 환경 하에서 DS/BPSK에 대한 BER 식은 다음과 같다[5].

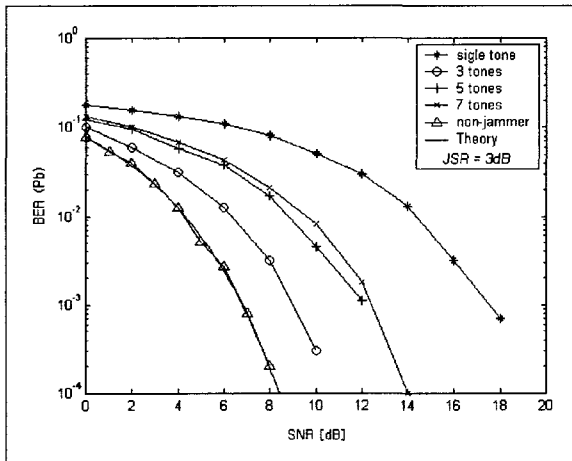
$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o + 2N_j}}\right)$$

$$= Q\left(\sqrt{\frac{2\frac{E_b}{N_o}}{1 + 2\frac{J}{S}\frac{E_b}{N_o}\frac{1}{G_p}\frac{1}{\rho}}}\right) \quad (15)$$

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 CBPSK 시스템의 반송파 주파수를 중심으로 ρ 에 따라 노이즈 재머의 대역이 변화한다.

1.2 Tone jammer

그림 7는 CBPSK 시스템의 톤 재머에 대한 AJ 성능을 분석한 것이다. JSR이 3dB인 단일 TJ와 MTJ ($M=3, 5, 7$)가 사용되었다. 사용된 톤 재머는 반송파 주파수를 기준으로 위치하며, 전체 스펙트럼 대역에 등간격으로 분포된 것으로 가정하였다. 그림에서



[그림 7] MTJ 환경에서 CBPSK 시스템의 AJ 성능 곡선($G_p=5$)

보면 재머가 없고 AWGN(additive white gaussian noise)만 있는 환경에서 CBPSK 시스템은 이론적인 BPSK 시스템의 BER곡선과 일치한다. 톤재머 환경에서 시뮬레이션의 결과로 10^{-2} 을 만족하기 위한 요구 SNR은 단일 톤재머인 경우 14.4dB, MTJ ($M=3$)인 경우 6.5dB, MTJ($M=5$)인 경우 8.7dB, 그리고 MTJ ($M=7$)인 경우 9.6dB이다. 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 6과 비교해 봤을 때, 노이즈 재머가 톤 재머보다 동일 JSR에서 통신 성능을 저하시킨다. 이는 확산 대역내에 순시주파수가 임의로 변하는 chirp 방식의 고유특성으로 인해 톤재머인 경우, 노이즈재밍 보다 송신신호에 재밍 가할 확률이 낮아지기 때문이다.

2. FH/CBFSK과 FH/BCM의 AJ 성능분석

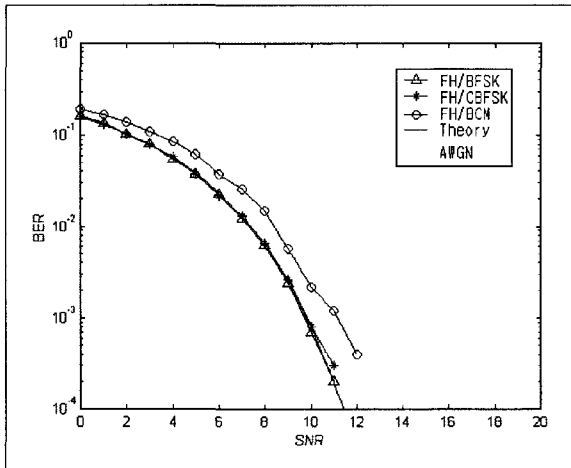
FH/CFSK과 FH/BCM 시스템의 AJ 성능을 분석하기 위한 시뮬레이션 변수는 표 1과 같다.

시뮬레이션에서 FH/BFSK와 FH/CBFSK, FH/BCM의 대역은 동일하다. 그림 8는 위의 3가지 시스템에 대한 AWGN 채널에서 BER 성능을 보인다. 그림에서 FH/CFSK는 이론적인 FH/BFSK와 동일한 성능을 보이지만, FH/BCM은 정보 신호 0과 1사이의 cross-correlation이 존재하여 orthogonal은 아니기 때문에 FH/BFSK와 FH/CBFSK보다 SNR이 약 1dB 가량 증가한다.

그림 9는 AWGN 채널에서 JSR이 12dB이고, FH=32인 경우, 이들 시스템의 fractional ratio (ρ)에 따른 AJ 성능 곡선을 나타낸다. PBNJ의 ρ 는 재머 대역 대 전체 호핑 대역의 비이다. 그림에서 FH/CBFSK는 FH/BFSK 시스템과 비교하여 약간의 AJ

[표 1] FH/CBFSK와 FH/BCM의 시뮬레이션 변수

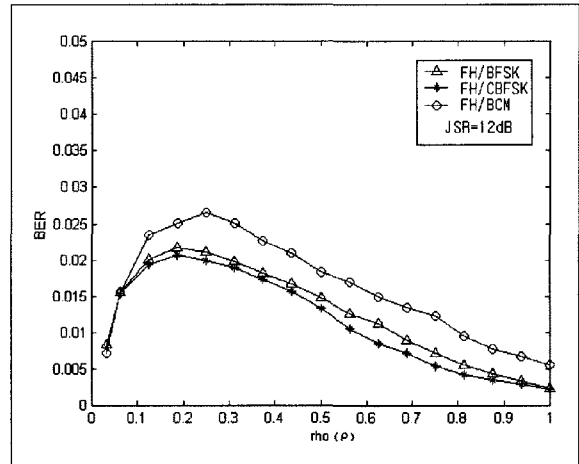
	FH/CBFSK	FH/BCM
심볼 레이트	10[Hz]	10[Hz]
반송파주파수	$f_{c1}=70$ [Hz] $f_{c2}=90$ [Hz]	$f_c=80$ [Hz]
chirp주기(T_c)	0.5	0.5
a	20	± 40
호핑수(i_h)	32	32



[그림 8] AWGN에서 FH/BFSK, FH/CBFSK, FH/BCM의 BER

성능을 보인다.

이는 FH/CBFSK는 홉 대역내에서 chirp에 의한 주파수의 sweep 효과가 있기 때문이다. 그러나 chirp에 의한 대역 확산 효과는 없기 때문에 큰 성능 개선은 없다. FH/BCM은 대역 확산 효과는 있으나, 두 신호의 cross-correlation 존재하기 때문에 BER 성능이 나빠진다. 이 때문에 PBNJ 환경에서 가장 나쁜 성능을 보인다.



[그림 9] FH/BFSK, FH/CBFSK, FH/BCM의 rho에 따른 AJ 성능

V. 결론

본 논문에서는 CBPSK 시스템에 대한 LPI 및 AJ 성능을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫째로, chirp parameter인 T_c 에 의해 LPI 특성이 결정된다. T_c 가 작은 경우에 인터셉터의 출력에서 spectrum line이 검출된다. 하지만 T_c 가 큰 경우에 인터셉터의 출력에서 spectrum line이 검출되지 않는다. 연구 결과에서 chirp parameter T_c 가 8이상일 때 좋은 LPI 특성을 얻는다. 둘째로, CBFSK 방식이 DS/BPSK 방식보다 우수한 AJ 성능을 가진다. 본 논문에서 시뮬레이션과 수치해석의 결과로 CBPSK 시스템이 노이즈재미 환경에서 DS/BPSK 시스템보다 AJ 성능이 우수함을 보였다. 마지막으로, 동일 JSR을 갖는 노이즈 재머와 톤 재머의 경우에 chirp 방식은 노이즈 재머인 경우 통신 성능이 저하되는 반면 MTJ에서 우수한 AJ 성능이 있다.

Chirp 변조를 이용한 FH/CBFSK과 FH/BCM,

FH/BFSK의 AJ 성능 비교 결과로, FH/CBFSK은 FH/BFSK와 비교하여 약간의 AJ 성능이 얻어진다. 이는 호핑 밴드내에서 주파수 sweep하여 얻은 효과이며, chirp에 의한 대역 확산이 없기 때문에, FH/CBFSK의 AJ 효과는 크지 않다. 반면 FH/BCM은 대역 확산 효과가 있지만, 두 신호의 cross-correlation 존재하기 때문에 BER 성능이 나빠진다.

참 고 문 헌

- [1] Larry Lam, "The Symmetry in A Chirp Filter And Its Application to LPI Communication", *MILCOM '90, Confer. Record, A New Era*, vol.1 pp.193~196, 1990.
- [2] A. Springer, W. Gugler, M. Huemer, L. Reindl, C.C.W Ruppel, R. Weigel, "Spread spectrum communications using chirp signals", *IEEE/AFCEA*, pp.166~170, 2000.
- [3] J.R. Yoo, "LPI Waveform Shaping by Modified Chirp Filter", *MILCOM '92, Conference Record Communications*, vol.3, pp.1231~1235, 1992.
- [4] J.Q. Pinkney, A.B. Sesay, S. Nechols, R. Behin, "A Robust High Speed Indoor Wireless Communications System using Chirp Spread Spectrum", *IEEE Canadian Conference*, vol.1, pp.84~89, 1999.
- [5] R.L. Peterson, R.E. Ziemer, D.E Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications*. Prentice-Hall, 1995.
- [6] D. L. Nicholson, Sandy Kahl, *Spread Spectrum Signal Design : LPE and AJ Systems*, W H Freeman & Co, 1988.