

재밍 환경에서 변조방식에 따른 무선통신시스템의 BER 성능 분석

Bit Error Rate Performance Analysis of Wireless Communication System for each Modulation Scheme under Jamming

고광춘¹, 오성민¹, 김재현¹, 박우철², 김기근³

Kwang-Chun Go¹, Sung-Min Oh¹, Jae-Hyun Kim¹, Woo-Chul Park², Ki-Keun Kim³

¹아주대학교 전자공학과, ²방위사업청, ³국방과학연구소

¹Department of Electronics Engineering, Ajou University, ²Defense Acquisition Program Administration,

³Agency for Defense Development

주소 : 경기도 수원시 영통구 원천동 아주대학교 원천관 331 호

연락처 : 031-219-2474 이메일 : light3754@ajou.ac.kr

Abstract: 위성통신시스템에서는 재밍에 의한 간섭을 줄이기 위해 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 방식을 사용한다. 최근 연구에서는 무선채널에 존재하는 재밍 신호의 특성과 대역확산 방식, 변조방식, 길쌈부호의 사용 여부에 따라 위성통신시스템의 전송 성능 분석이 이루어졌다. 하지만 최근 연구에서는 각각의 방식이 사용될 때의 성능 차이에 대해 비교 분석이 수행되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 PBNJ(Partial-Band Noise Jamming) 환경에서 NC-MFSK(Non-Coherent M-ary Frequency-Shift Keying), SDPSK(Symmetric Differential Phase-Shift Keying), GMSK(Gaussian filtered Minimum-Shift Keying)의 세가지 변조 방식과 콘볼루션 부호화의 사용 여부에 따른 무선통신시스템의 BER 성능 변화를 분석한다. 또한 성능 평가를 통해 각 전송환경에서 성능을 극대화할 수 있는 최적의 전송 방식을 제안한다.

Keywords: Jamming, FHSS, Modulation, BER

1. 서론

위성통신은 개방된 전송채널을 이용하여 데이터를 전송한다. 그러나 개방된 전송채널에서는 의도적인 재밍 신호에 의한 간섭이 발생할 수 있으며, 이는 통신성능을 감소시킬 수 있다. 따라서 위성통신시스템이 항재밍 능력을 보유하도록 하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 현재 위성통신시스템에서는 재밍의 간섭효과를 줄이기 위해 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 방식을 사용하고 있다. FHSS 방식은 무작위로 주파수 채널을 도약하며, 채널 도약 시 대상 채널에 대한 사전 스캐닝을 수행하여 방해전파가 있는 채널의 활동을 피함으로써 재밍신호에 의한 통신성능 저하를 감소시킬 수 있다. FHSS 방식은 채널을 도약하는 주기의 길이에 따라 SFH(Slow Frequency Hopping) 방식과 FFH(Fast Frequency Hopping) 방식으로 나뉜다. SFH 방식은 채널 도약 주기가 긴 방식으로 한 주기 동안 하나 또는 다수의 데이터 비트를 전송할 수 있으며 동기식 데이터 검출이 가능하다. 반면, FFH 방식은 채널 도약 주기가 짧아 여러 개의 채널을 도약하는 동안 하나의 데이터 비트가 전송되며 동기식 신호 검출이 어렵고 구현하는데 비용이 많이 든다. 하지만 FFH 방식은 SFH 방식에 비해 확산처리 이득에서 우수한 특성을 갖는다.

차세대 위성통신시스템에서는 재밍에 의한 통신성능 저하를 줄이기 위해 SFH 방식이 MFSK, SDPSK, GMSK 등 여러 변조방식과 함께 사용되는 경우에 대해 활발히 연구되고 있다. 하지만 기존 연구에서는 변조 방식의 변화에 따른 성능 비교 및 채널 부호화의 적용 유무에 따른 성능 비교가 이루어 지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 차세대 위성통신시스템에 적용 가능한 변조 방식이 채널 접송 방식으로 SFH와 함께 사용될 때 무선채널에서 발생하는 재밍의 특성에 따라 BER 성능의 변화를 살펴보고자 한다.

2. 관련 연구

이번 단락에서는 재밍의 종류와 변조 방식에 따른 특성을 살펴보고자 한다.

2.1 재밍

재밍은 크게 두 가지 방법에 의해 구분할 수 있다[1]. 먼저 공격 방법에 따라서는 부분 대역 재밍과 광대역 재밍으로 나눌 수 있다. 그림 1은 주파수 대역에서 재밍의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 잡음 전력 J 는 전체 확산 대역 W_{ss} 중 일부분인 W_j 대역에 분포한다. 이때 전체 확산 대역 중 잡음의 분포 비율은 ρ 로 나타내며 수식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{W_j}{W_{ss}}, \quad (1)$$

수식 (1)에서 ρ 의 값이 1보다 작은 경우 부분 대역 잡음이 되며, ρ 가 1인 경우 광대역 잡음이 된다. 또한 재밍은 공격 대상에 따라 펄스 재밍, 링크 계층 재밍, 네트워크 계층 재밍 등 다양하게 나뉠 수 있다. 본 논문에서는 재밍의 공격 방법에 따른 통신 성능 감소에 대해서만 고려하도록 한다.

2.2 변조 방식

본 논문에서는 변조 방식으로 MFSK(Multiple Frequency Shift Keying)와 SDPSK(Symmetrical Differential Phase Shift Keying), GMSK(Gaussian filtered Minimum Shift Keying)를 고려하도록 한다. MFSK는 M개의 서로 다른 주파수를 갖는 신호를 이용하여 데이터를 전송하는 방식이다. 이 방식에서는 같은 E_b/N_j 에서 M 값이 증가할수록 BER 성능이 향상된다. SDPSK는 서로 직교성을 갖는 4개의 심볼을 이용하는

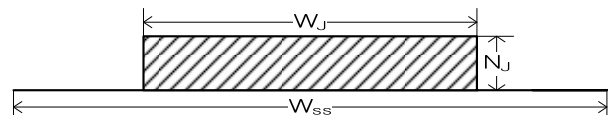


그림 1. 재밍의 대역 분포
Fig. 1. Noise jammer frequency distribution

방식으로, 입력되는 데이터 심볼에 따라 위상을 $\pi/2$ 단위로 회전시키는 방식이다[2]. 수식 (2)는 SDPSK에서 입력되는 데이터 심볼에 따라 위상의 변화를 나타낸 것이다.

$$S_n(t) = A \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} \cdot a_n\right), \quad (2)$$

where $a_n = a_{n-1} - 1$ for $I_n = 0$, $a_n = a_{n-1} + 1$ for $I_n = 1$, $a_0 = 0$

이때, $S_n(t)$ 는 데이터를 전송할 때 사용되는 신호의 위상을 나타내며, A 는 신호의 진폭을, a_n 은 상수로서 입력되는 데이터에 따라 가감된다.

GMSK는 MSK 변조를 수행하기 전에 가우시안 필터를 사용하여 디지털 입력신호를 필터링하게 된다. 이 과정을 통해 PSD(Power Spectral Density) 함수에서 MSK와 비교하여 Main lobe의 폭은 줄어들고 Side lobe의 크기는 감소하게 된다. 따라서 MSK에 비해 대역을 효율적으로 활용할 수 있게 된다. GMSK의 PSD 특성은 BT(Bandwidth Time product)라는 상수에 의해 결정되며, BT는 가우시안 필터의 3dB 대역폭과 데이터 비트의 주기를 곱하여 얻을 수 있다. 그림 2는 BT에 따른 GMSK 변조 방식의 PSD 특성을 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 BT가 커질수록 MSK의 특성과 유사해지며, BT가 작을수록 Side lobe의 제거 비율이 높아진다.

3. 시스템 모델

본 논문에서는 성능평가를 위해 그림 3과 같은 시스템 모델을 가정하였다. 전송될 데이터는 콘볼루션 부호화와 변조 과정을 거치게 된다. 변조된 데이터를 전송하기 위한 채널은 PN(Pseudo random Number)에 의해 주기적으로 랜덤하게 선택된다. 또한 무선채널에서는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)과 재밍에 의한 성능 감소가 발생하는 것을 가정하였다. 성능평가는 PBNJ(Partial-Band Noise Jamming) 모델에서 재밍의 특성을 결정하는 ρ 값을 변화시켜가며 수행하였다.

전송된 신호의 복호화 시, BER(Bit Error Rate)은 수식 (3)과 같이 도약 대상 채널에 재밍이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 고려하여 구할 수 있다[3].

$$P_b = (1 - \rho) \cdot P_1 + \rho \cdot P_2 \cong \rho \cdot P_2, \quad (3)$$

여기서 P_1 은 채널에 재밍이 존재하지 않는 경우의 BER이며, P_2 는 재밍이 존재하는 경우의 BER이다. 수식 (3)에서는 P_1 이 매우 작다고 가정하였다.

4. 성능 평가

이번 장에서는 SFH 방식을 사용할 때, 각 변조 방식 별 재밍의 특성에 따른 BER 성능을 구하고, 성능평가 결과에 대해 살펴보고자 한다. 성능평가를 위해 필요한 파라미터는 표 1에 나타내었다. 표 1에서 콘볼루션 부호화를 사용하는 경우 r은 부호화율을 나타낸다.

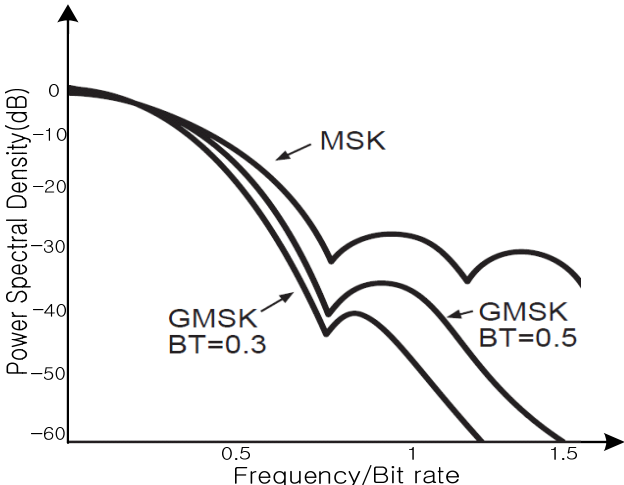


그림 2. GMSK의 power spectral density
Fig. 2. Power spectral density of GMSK

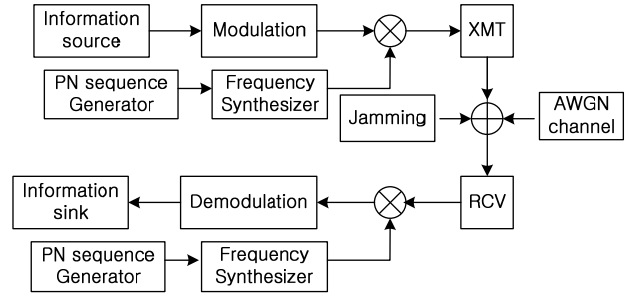


그림 3. 시스템 구성도
Fig. 3. System block diagram

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameter		Value	
Data rate	Uncoded	256kbps	
	Coded	64kbps	
ρ		0.01, 0.1, 0.5, 1	
BT in GMSK		0.25, 1	
Uncoded NC-BFSK, SDPSK, GMSK	SFH	16 symbols/hop	
	Hopping rate	16 khops/sec	
Uncoded NC-QFSK	SFH	16 symbols/hop	
	Hopping rate	8 khops/sec	
Uncoded NC-8FSK	SFH	8 symbols/hop	
	Hopping rate	10.7 khops/sec	
Coded NC-BFSK, SDPSK, GMSK	SFH(r=1/2)	8 symbols/hop	
	SFH(r=1/3)	16 symbols/hop	
	Hopping rate(r=1/2)	16 khops/sec	
Coded NC-QFSK	SFH(r=1/2)	8 symbols/hop	
	SFH(r=1/3)	16 symbols/hop	
	Hopping rate(r=1/2)	8 khops/sec	
Coded NC-8FSK	SFH(r=1/2)	8 symbols/hop	
	SFH(r=1/3)	16 symbols/hop	
	Hopping rate(r=1/2)	5.3 khops/sec	
		Hopping rate(r=1/3)	4 khops/sec

4.1 콘볼루션 부호화를 사용하지 않는 경우

4.1.1 NC-MFSK를 사용하는 경우

NC-MFSK가 사용될 경우 BER은 M 이 2인 경우와 2 이상인 경우, 수식 (4), (5)와 같이 각각 구할 수 있다[3].

$$P_b = \frac{\rho}{2} \cdot e^{-\rho(E_b/2N_j)}, \quad (4)$$

$$P_b = \frac{\rho \cdot 2^{K-1}}{2^K - 1} \sum_{i=1}^{2^K - 1} \binom{2^K - 1}{i} \frac{(-1)^{i+1}}{i+1} e^{-\frac{iK((E_b \cdot \rho)/N_j)}{i+1}}, \quad (5)$$

여기서 $K = \log_2(M)$ 이며, M 은 변조를 통해 생성될 수 있는 심벌의 수이다. 수식 (4)와 (5)를 통해 BER은 ρ 가 감소함에 따라 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 성능분석 결과를 이용하여 M 이 2와 4인 경우에 성능평가를 수행한 결과 그림 4와 그림 5의 결과를 얻었다. 그림 4는 M 이 2인 NC-BFSK가 사용될 경우 ρ 에 따른 BER 성능을 나타낸 것이다. 그림 4로부터 이론적인 결과와 성능평가 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 M 이 4인 NC-QFSK가 사용될 때의 성능평가 결과이다. 그림 4와 그림 5의 결과로부터 M 이 증가할수록 BER 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

4.1.2 SDPSK를 사용하는 경우

SDPSK를 사용하는 경우 BER 성능은 수식 (6)과 같이 구할 수 있다[4].

$$P_b = \frac{\rho}{2} \cdot e^{-\rho(E_b/N_j)}. \quad (6)$$

그림 6은 SDPSK의 수식 (6)의 이론적인 결과와 시뮬레이션

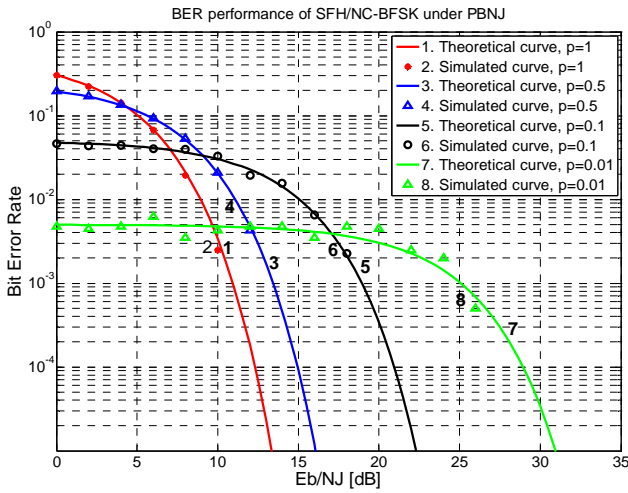


그림 4. Uncoded SFH/NC-BFSK의 BER 성능
Fig. 4. BER performance of uncoded SFH/NC-BFSK

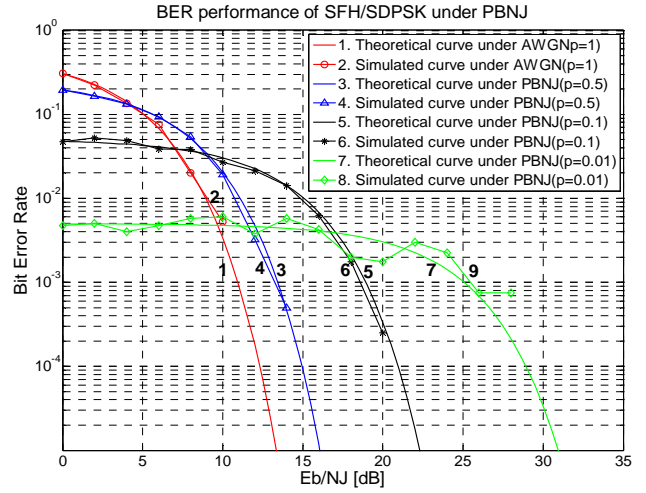


그림 6. Uncoded SFH/SDPSK의 BER 성능
Fig. 6. BER performance of uncoded SFH/SDPSK

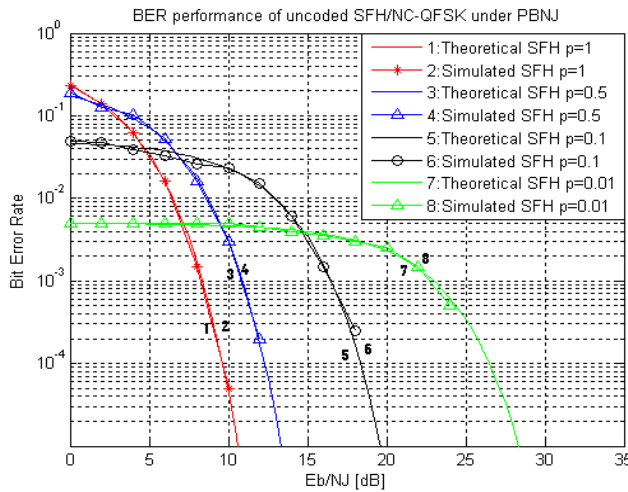


그림 5. Uncoded SFH/NC-QFSK의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of uncoded SFH/NC-QFSK

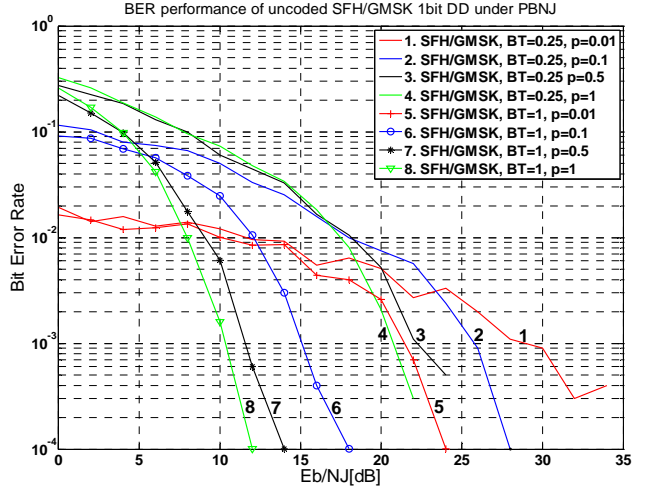


그림 7. Uncoded SFH/GMSK의 BER 성능
Fig. 7. BER performance of uncoded SFH/GMSK

결과를 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 PBNJ에서 SDPSK의 BER 성능이 SFH/NC-BFSK의 경우와 유사하게 ρ 가 큰 경우 E_b/N_j 가 작을 때 가장 성능이 나쁘며, ρ 가 작을 때에는 E_b/N_j 가 클 때 가장 나쁜 성능을 보였다.

4.1.3 GMSK를 사용하는 경우

GMSK가 1-bit 시차 검출과 함께 사용될 경우 SFH/GMSK의 이론적인 BER을 구하는 것이 어려워 본 논문에서는 시뮬레이션만을 수행하여 성능을 분석하였다. 그림 7은 BT가 각각 0.25, 1인 경우 SFH/GMSK의 BER 성능을 나타낸 것이다. 그림 7로부터 E_b/N_j 가 작을 때에는 ρ 가 1일 때 BER이 가장 높게 나타났으며, BT가 클수록 BER 성능이 향상하는 것을 알 수 있다. 이는 BT가 커질수록 ISI(Inter Symbol Interference)가 줄어들기 때문이다.

4.2 콘볼루션 부호화를 사용하는 경우

본 절에서는 콘볼루션 부호화가 사용되는 경우의 BER 성능을 구하도록 한다. 콘볼루션 부호화가 사용되는 경우 이론적인 BER 성능 분석 결과를 얻기는 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 각각의 변조방식에서의 BER 성능을 구하여 보도록 한다.

4.2.1 NC-MFSK를 사용하는 경우

그림 8은 콘볼루션 부호화가 사용되고 변조 방식은 NC-BFSK가 사용될 경우의 BER 성능을 나타낸 것이다. 그림 8로부터 ρ 가 0.5와 1인 경우 E_b/N_j 가 각각 8dB, 9dB보다 큰 경우 부호화 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 부호화 이득은 ρ 값에 관계없이 부호화율이 낮을수록 더 높게

나타나는 것을 알 수 있다. 마지막으로 그림 4와 그림 8로부터 ρ 값의 변화에 따른 BER 성능의 변화는 콘볼루션 부호화를 사용하지 않는 경우와 같은 패턴으로 변화하는 것을 알 수 있다.

4.2.2 SDPSK를 사용하는 경우

그림 9는 변조 방식으로 SDPSK가 사용될 경우의 BER 성능을 나타낸다. 그림 9로부터 ρ 가 0.5인 경우 약 6dB 이상에서 부호화 이득을 얻을 수 있는 것을 알 수 있으며, 부호화율이 1/2일 때가 1/3일 때와 비교하여 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 ρ 가 0.5인 경우 모든 E_b/N_j 에서 부호화 이득을 얻을 수 있으며, 약 8dB 이상에서 부호화율이 1/2일 때 더 큰 부호화 이득을 얻을 수 있다.

4.2.3 GMSK를 사용하는 경우

그림 10과 11은 콘볼루션 부호화와 GMSK가 사용될 경우 ρ 가 0.1과 1일 때의 BER 성능을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 BT가 커질수록 BER 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 한 예로 ρ 가 1이고 BER이 0.01, 부호화율이 1/2인 경우, BT가 0.25에서 1로 증가할 때 약 4dB 정도의 이득을 얻을 수 있다. 이는 BT가 커질수록 인접 심볼에 미치는 간섭의 효과, 즉 ISI가 줄어들기 때문이다. 또한 그림 10과 11로부터 ρ 가 클 때 E_b/N_j 이 증가할수록 BER 성능이 빠르게 개선되는 것을 알 수 있다. 이 이유는 ρ 가 클수록 대역 전체에서 재밍 신호의 크기가 감소하기 때문에 E_b/N_j 가 조금만 증가하여도 성능이 크게 개선되기 때문이다.

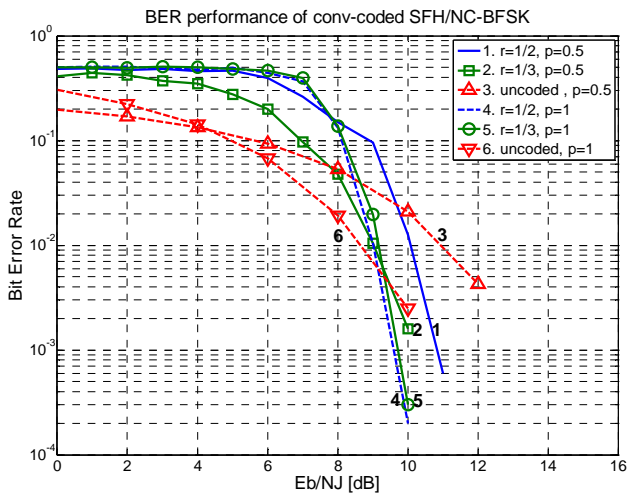


그림 8. Conv.-coded SFH/NC-BFSK의 BER 성능
Fig. 8. BER performance of conv.-coded SFH/NC-BFSK

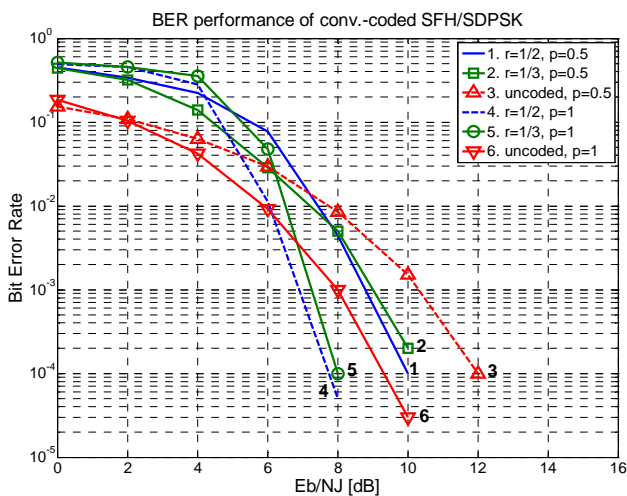


그림 9. Conv.-coded SFH/NC-BFSK의 BER 성능
Fig. 9. BER performance of conv.-coded SFH/NC-BFSK

4.3 분석 결과의 활용

4장에서 분석된 성능평가 결과는 전송환경에 따라 최적의 전송 방식을 찾는 데 활용될 수 있다. 한 예로 시스템의 타겟 BER이 정해져 있고, 특정 변조 방식을 사용할 경우, 측정된 채널환경에서 타겟 BER을 만족시키기 위한 E_b/N_f 값을 도출할 수 있다. 또는 특정 채널환경에서 타겟 BER을 만족하는 변조방식을 찾아내는데 활용할 수도 있을 것이다. 예를 들어, 타겟 BER이 0.001이고 현재 채널에 $\rho=0.5$ 의 특성을 갖는 재밍 신호가 존재하며 콘볼루션 부호화를 사용하지 않는 경우, NC-BFSK와 SDPSK는 약 14dB 이상에서 사용할 수 있으며, NC-QFSK는 약 11dB에서 사용 가능하다. 또한 BT가 0.25인 GMSK에서는 약 22dB 이상에서 사용 가능하며, BT를 증가시킬 경우 수신 신호의 세기가 보다 낮은 경우에도 사용 가능함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 SFH 시스템에서 NC-MFSK, SDPSK, GMSK의 변조방식이 사용될 경우 PBNJ 환경에서 ρ 값에 따른 BER 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과, ρ 가 클수록 BER 성능이 E_b/N_f 의 변화에 민감하게 나타났다. 또한 GMSK의 경우, BT가 증가할수록 BER 성능이 감소하는 것을 확인하였다.

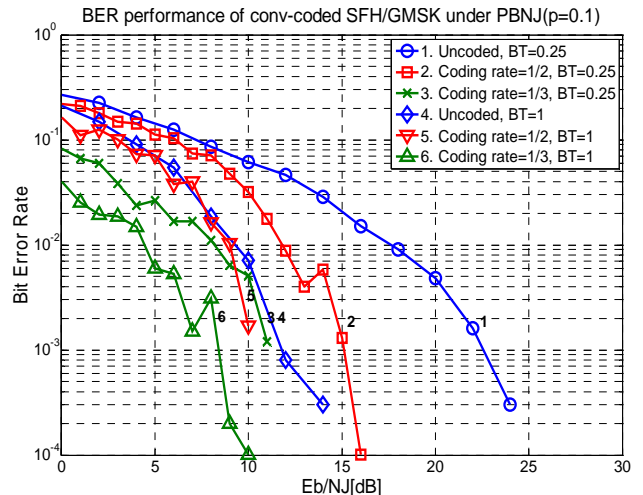


그림 10. Conv.-coded SFH/GMSK의 BER 성능 ($\rho=0.1$)
Fig. 10. BER performance of Conv.-coded SFH/GMSK ($\rho=0.1$)

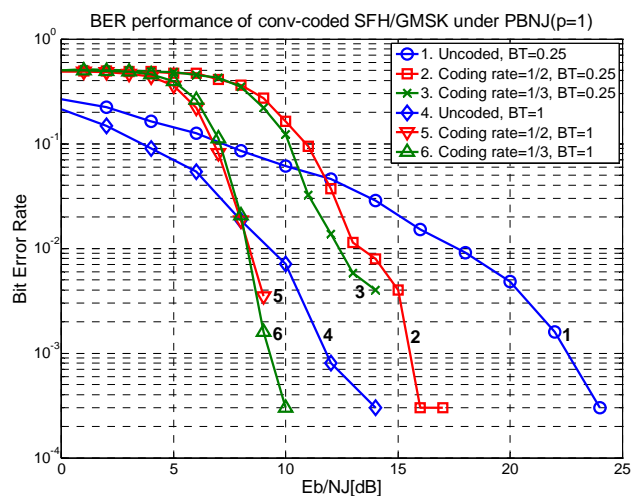


그림 11. Conv.-coded SFH/GMSK의 BER 성능 ($\rho=1$)
Fig. 11. BER performance of Conv.-coded SFH/GMSK ($\rho=1$)

분석된 결과와 성능평가를 위해 구현한 시뮬레이터는 특정 전송환경에 적합한 변조방식 또는 파라미터 값을 찾는 데 활용할 수 있으며, 이론적인 결과 분석이 어려운 GMSK, 콘볼루션 부호화가 사용될 경우 설계된 시스템의 성능 평가 도구로 활용할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-(C1090-1021-0011))

참고 문헌

- [1] B. Skalar, Digital Communications fundamentals and applications, Prentice Hall, 1988.
- [2] A. A. Masoud and A. G. Qureshi, "Robust FFT-Based Block Demodulation in the Presence of Symbol Synchronization Jitter, Using Symmetric, Differential, Phase Shift, Keying (SDPSK)" in IEEE ICC '99, Vancouver, BC, Canada, June, 1999, pp. 1278-1284.
- [3] M. K. Simon, J. K. Onura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, pp. 475-480, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Spectrum Communications*, pp. 68-75, 337-350, Prentice Hall, 1995.