

부분 대역 재밍 채널에서 LDPC 부호화된 주파수 도약 BFSK 시스템의 소실 삽입 및 클리핑 기법

박진수*, 김인선*, 송홍엽°, 양필웅**, 노종선**, 한성우***

Erasure Insertion and Clipping for LDPC Coded Frequency-Hopping Non-Coherent BFSK System over Partial-Band Jamming Channel

Jinsoo Park*, Inseon Kim*, Hong-Yeop Song°, Pilwoong Yang**, Jong-Seon No**, Sung Woo Han***

요약

본 논문에서는 부분 대역 재밍 채널에서 LDPC 부호화된 주파수 도약 BFSK 시스템의 신뢰도를 높이기 위한 소실 삽입 기법과 클리핑 기법을 제안하고 그들의 성능을 비교한다. 기존 항 재밍 대수 부호에 대해 널리 연구된 소실 삽입 기법을 LDPC 부호에 적용할 때의 성능 열화가 발생함을 확인하고, 클리핑 기법을 이용하여 이를 극복한다. 또한 다양한 PBJ 채널 상황에서 두 기법을 비교 분석한다.

Key Words : Frequency-hopping, frequency shift keying, LDPC codes, partial-band jamming, clipping

ABSTRACT

In this paper, we propose a clipping method for LDPC coded FH BFSK system over partial-band jamming channel. We apply the erasure insertion technique, which had been studied much earlier, now to LDPC codes and discuss its performance degradation region. By using clipping technique, the performance degradation can be removed. Finally, we discuss the erasure insertion and clipping techniques for various jamming conditions.

1. 서론

군 통신 시스템에서는 재밍 공격의 효과를 줄이기 위해 주파수 도약 대역 확산 (Frequency-hopping spread-spectrum, FH SS) 기법을 주로 사용한다^[1]. 부

분 대역 재밍(partial-band jamming, PBJ) 공격에 대하여 주파수 도약 기법을 이용하면 재밍 공격이 있는 주파수 대역을 확률적으로 회피할 수 있다. 하지만, 완벽하게 재밍 대역을 회피 하지는 못하므로, 재밍 대역과 통신 대역이 겹쳤을 경우 수신 신호의 품질은 열

※ This work was supported by EWRC program of Agency for Defence Development of Korea.

♦ First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, js.park09@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, hysong@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, is.kim@yonsei.ac.kr, 학생회원

** Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, yangpw@ccl.snu.ac.kr, 학생회원, jsno@snu.ac.kr, 종신회원

*** Agency for Defence Development hansw79@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2015-03-053, Received March 20, 2015; Revised May 8, 2015; Accepted June 17, 2015

화 된다. 이렇게 열화된 수신 성능을 향상시키기 위해서 인터리버(interleaver)와 채널 부호(channel codes)가 사용된다¹⁻³. 이를 위해 주로 RS 부호와 길쌘부호 등이 적용되어 왔는데, 이들 부호의 경관정 기반 오류 및 소실 심볼에 대한 정정을 수행할 수 있는 특징을 이용하여 소실 삽입(erasure insertion, EI) 기법이 연구되어왔다⁴⁻⁷. 간단한 구현을 위하여 주로 어떠한 측정값이 임계값(threshold) 이상 또는 이하를 가질 경우 해당 심볼을 소실 처리, 즉 삭제하는 기법이 논의되었다. 소실 삽입 기법을 이용하여 오류가 있는 심볼을 효과적으로 삭제하고 오류 및 소실 정정 복호기를 사용면, 소실 삽입 기법을 사용하지 않고 오류만을 정정하는 경우 대비 성능 향상이 있음이 널리 알려져 있다⁴⁻⁷.

최근 연관성 복호 기반의 저밀도 패리티 검사 행렬(low-density parity-check, LDPC) 부호가 채널 용량에 근접한 성능을 가지는 것으로 알려진 이후⁸⁻⁹ LDPC 부호에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 본 논문에서는 부분 대역 재밍 채널에서 LDPC 부호를 이용하는 FH BFSK(binary frequency shift keying) 시스템에 소실 삽입 기법을 적용한 경우의 성능을 살펴본다. 또한, 소실 삽입 기법의 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 클리핑(clipping) 기법을 제안하고 이들의 성능을 살펴본다.

II장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 살펴보고, III장에서 부분 대역 재밍 환경에서의 특징을 논의하며 소실 삽입과 클리핑 기법을 소개한다. IV장에서는 임계값 최적화 과정을 보이고 두 기법의 성능을 비교하며, V장에서는 결론을 통해 본 논문을 마무리 한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 LDPC 부호화된 FH BFSK 시스템과 PBJ 및 AWGN(additive white Gaussian noise) 채널을 나타낸다. 일반적으로 항 재밍 통신 시스템에는 인터리버도 사용되나, 본 논문에서는 인터리버를 생략하도록 한다. AWGN은 전대역에 걸쳐 평균이 0이며 PSD(power spectral density)가 $\sigma^2 = N_0/2$ 인 가우시안 분포로 모델링 하였고, PBJ 신호는 가용 대역 대비 ρ 의 비율로 가우시안 재밍 신호가 들어가는 것을 가정할 때, 평균이 0이며 재밍 대역 내에서 $N_j/2\rho$ 의 PSD를 갖는 것으로 모델링 하였다. E_s 를 송신 심볼 당 에너지라 할 때, 수신기는 E_s/N_0 를 알고 있으나

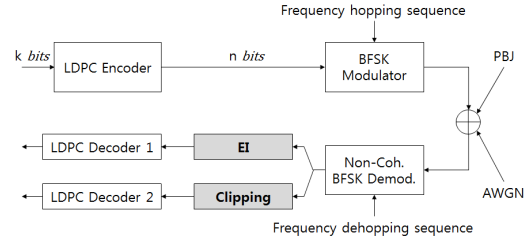


그림 1. PBJ와 AWGN이 있는 채널에서의 LDPC 부호화된 FH BFSK 시스템 모델. 소실 삽입(EI)과 클리핑(Clipping) 블록은 복조기와 복호기 사이에 위치한다.

Fig. 1. System model of LDPC coded FH BFSK system over PBJ and AWGN channel. EI and clipping is equipped between demodulator and decoder.

재밍 신호의 통계적 특성은 알지 못하는, 즉 E_s/N_j 는 모르는 상태로 가정한다.

송/수신기가 공유하는 주파수 도약 패턴은 완전히 random한 것으로 가정하고, 한 홉(hop)당 송신 심볼 수를 N 이라 하자. 그리고 LDPC 부호화기는 k 개의 정보 bit들을 n bit로 부호화 하며, 각 부호 bit들은 다음과 같이 BFSK 변조된다.

$$x(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(2\pi f_i t) \quad (1)$$

$x(t)$ 는 BFSK 송신 신호의 일반적인 형태이며, T 는 한 심볼이 전송되는 시간, $f_i, i \in \{0,1\}$ 는 선택된 hop에서 송신 bit에 따라 선택되는 송신 주파수이다. 이 때, 수신기가 수신한 신호 $r(t)$ 는 다음과 같다.

$$r(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(2\pi f_i t + \theta) + m(t) \quad (2)$$

(2) 식에서의 $m(t) = n_j(t) + n(t)$ 이며, $n_j(t)$ 와 $n(t)$ 는 각각 재밍 신호와 AWGN을 나타낸다. 재밍이 없는 경우는 간단히 $n_j(t) = 0$ 으로 표현 된다. θ 는 수신 신호와 수신기 사이의 위상 차이를 나타내는데, 0과 2π 사이의 임의의 값을 갖는다. 또한 본 논문에서는 $E_s = 1$ 로 가정한다.

그림 2는 위상 비동기 BFSK 복조기를 나타내는데, 각 주파수에 대한 검출기 출력값을 y_0 와 y_1 로 표기하도록 한다. 송신기가 f_0 주파수를 이용해 송신한 경우를 가정하여도 일반성을 잃지 않고 다음과 같이 표현 된다.

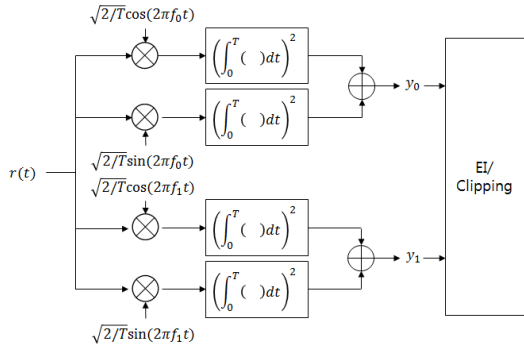


그림 2. BFSK의 위상 비동기 복조기.
Fig. 2. Non-coherent demodulator of BFSK.

$$\begin{aligned}
 y_0 &= 1 + 2(m_{0,c}\cos(\theta) + m_{0,s}\sin(\theta)) \\
 &\quad + m_{0,c}^2 + m_{0,s}^2 \\
 y_1 &= m_{1,c}^2 + m_{1,s}^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

이 때, $i = 0, 1$ 에 대하여 $m_{i,c}$ 와 $m_{i,s}$ 는 각각

$$m_{i,c} = \int_0^T \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_i t) m(t) dt
 \tag{4}$$

$$m_{i,s} = \int_0^T \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_i t) m(t) dt
 \tag{5}$$

이다.

LLR(log-likelihood ratio) 기반 연관정 복호를 수행하는 LDPC 복호기를 위해서는 각 수신 심볼을 이용하여 각 부호 bit의 LLR을 계산하여야 한다. 본 논문에서는 수신기가 E_s/N_0 를 알고 있으나 재밍 신호의 통계적 특성은 모르는 것으로 가정하였으므로, 수신기는 각 수신 심볼에 대하여

$$L = \frac{I_0(\sqrt{y_0}/\sigma^2)}{I_0(\sqrt{y_1}/\sigma^2)}
 \tag{6}$$

를 계산하여 이를 해당 부호 bit의 LLR로 사용한다^[10]. (6) 식에서의 $I_0(\cdot)$ 함수는 0차 변형된 베셀함수(modified Bessel function of order zero)이다.

III. 소실 삽입 과 클리핑 기법

3.1 부분 대역 재밍 환경에서 수신값 특성

재밍 신호가 일부 대역에 점점 강하게 들어오면 N_j

값이 점점 큰 값을 갖게 되고, 이는 (3)에 따라 수신기 출력단의 y_0 와 y_1 이 큰 값을 갖게될 확률을 증가시킨다. 따라서, 어떤 심볼에 대한 복조기 출력값을 살펴 보면 수신된 심볼이 재밍에 영향을 받았는지의 여부를 추정할 수 있게 된다.

만약 재밍에 영향을 받은 심볼들에 오류가 다수 발생했을 경우, 복호 실패 확률이 증가된다. 경관정 복호의 경우, 오류일 것으로 강하게 추정되는 심볼들은 복호에 사용하지 않고 소실 처리, 즉 해당 심볼을 삭제(erase)하는 것이 부호의 최소 거리(minimum distance) 차원에서 복호 확률을 증가시킨다는 결과가 발표된 바 있다^[4,6]. 이 때, 수신한 심볼에 대해 삭제 여부를 판단하는 방법이 성능에 큰 영향을 주는데, 다음의 소단원에서는 알려진 3가지 기법들을 설명하도록 한다.

3.2 소실 삽입 기법

본 소단원에서는 이전 연구결과^[4,6]에 소개된 경관정 복호 기반 소실 삽입 기법들을 소개한다. 가장 먼저 제안된 RTT(ratio threshold test) 기법^[4]은 어떤 임계값 $0 < \lambda < 1$ 가 주어졌을 때, 다음의 조건을 만족하면 해당 수신 심볼을 삭제 처리한다.

$$\frac{\min(y_0, y_1)}{\max(y_0, y_1)} > \lambda
 \tag{7}$$

RTT는 재밍 신호에 의해 $m(t)$ 가 커질수록 y_0 와 y_1 값이 비슷해 질 것이라는 판단에 기반한다.

OTT(output threshold test) 기법^[6]은 어떤 임계값 $0 < \tau$ 가 주어졌을 때,

$$\max(y_0, y_1) > \tau
 \tag{8}$$

를 만족할 경우 해당 심볼을 삭제한다. 이는, $m(t)$ 가 클 경우 y_0 와 y_1 이 커지므로, 어느 한 값이라도 과하게 클 경우 재밍에 의해 발생한 현상일 것이라는 판단에 기반한 것이다.

끝으로 MO-RTT(maximum output-ratio threshold test)는 RTT와 OTT를 모두 만족할 경우 해당 심볼을 삭제한다^[6]. 일반적으로 최적의 임계값을 사용할 경우 MO-RTT가 가장 좋은 성능을 갖지만, 재밍 신호가 강한 영역인 낮은 SJR(signal-to-jamming ratio)에서는 OTT만으로도 충분히 좋은 성능을 보이므로^[6] 본 논문에서는 OTT를 고려하도록 한다.

이전 연구^[6]에서는 경관정 기반 RS 부호에 대해, 삭제한 심볼을 소실 심볼로 가정하고 오류 및 소실 정정 복호를 수행하였다. 하지만, 본 연구에서 고려하는 LDPC 부호는 연관정 복호 부호로써, 삭제한 심볼은 LLR값을 0으로 주어 소실 처리한다.

3.3 클리핑 기법

앞서 소개한 소실 삽입 기법은 어떤 임계값을 이용하여 LLR값을 0으로 강제하였다. 본 논문에서 제안하는 클리핑 기법은 소실 삽입 기법과는 다르게, 어떤 임계값 $0 < \mu$ 에 대하여

$$y_i = \mu \text{ if } y_i > \mu, i \in \{0,1\} \quad (9)$$

을 수행한다. 만약 y_0 과 y_1 이 모두 μ 보다 클 경우에는 OTT와 동일하게 LLR이 0으로 계산되지만, y_0 또는 y_1 하나만이 μ 보다 클 경우에는 OTT와 다른 LLR값이 계산된다.

클리핑 기법은 한 심볼을 삭제하여 최소 거리 차원에서 이득을 보는 소실 삽입 기법의 장점을 조금 다르게 구현하는 것으로, 신뢰도 전파 (belief propagation)^[11]를 이용하는 연관정 복호기에서의 오류 전파(error propagation)효과를 억제하여 복호 성공률을 높이는 접근법이다. OTT의 경우 y_0 와 y_1 중 하나만 임계값을 넘겨도 해당 심볼을 삭제하여 LLR값이 0이 된다. 하지만, 실제 E_b/N_j 를 이용해 정확한 LLR값을 계산한다면 0이 아닌 값일 확률이 높다. 수신기가 E_b/N_j 를 모른다는 본 논문의 가정 하에서 이러한 차이를 보정하기 위해, 복조기 출력값을 클리핑하도록 설계하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 성능 비교

4.1 임계값의 최적화

두 기법의 성능 비교를 위해 앞서 설명한 BFSK 변/복조기법과 IEEE 802.11n의 길이 1296, 부호율 0.5인 LDPC 부호를 공통적으로 사용하였다. LDPC 부호의 복호를 위해 sum-product 기반 신뢰도 전파 알고리즘^[11]을 사용하였다. 또한 $N=100$ 의 BFSK 심볼 단위로 주파수 도약을 하였고 인터리버는 사용하지 않았다.

우선, 소실 삽입 기법과 클리핑 기법 모두 임계값이 주어져야 하므로 이에 대한 최적화 과정이 필요하다. 본 논문에서는 수신기가 E_b/N_j 를 모른다고 가정했

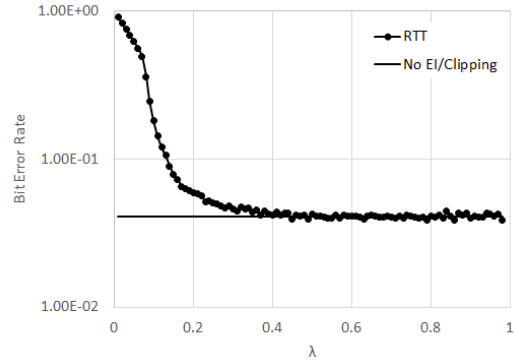


그림 3. 임계값 λ 의 변화에 따른 RTT 기법의 성능 변화. Fig. 3. Performance of RTT for various threshold λ values.

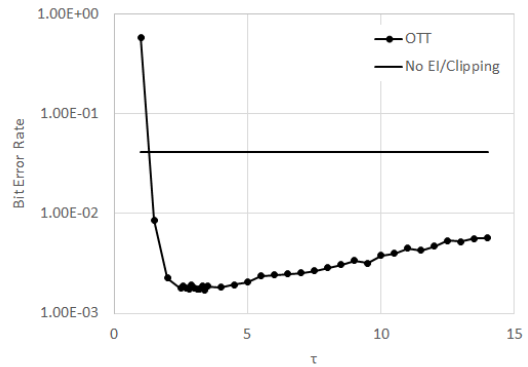


그림 4. 임계값 τ 의 변화에 따른 OTT 기법의 성능 변화. Fig. 4. Performance of OTT for various threshold τ values.

므로, 여러 채널 상황에 동일한 임계값을 사용하도록 하였다. 이를 위해 PBJ 10%, 즉 $\rho=0.1$ 이며 $E_b/N_j=0dB$, $E_s/N_0=10dB$ 인 채널 상황에 대해, 임계값을 변화시켜가며 BER을 살펴보고 가장 낮은 BER을 갖는 최적의 임계값을 시뮬레이션에 사용하였다.

그림 3의 원형 표식은 임계값 λ 에 따라 변화하는 RTT의 성능을 보여준다. 참고를 위해 소실 삽입 및 클리핑 기법을 적용하지 않은 경우(No EI/Clipping)의 성능을 실선으로 나타내었다. RTT의 경우 임계값은 0과 1사이의 값을 갖는데, 전 영역에 걸쳐서 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 적용하지 않았을 때 보다 성능이 좋지 못하다. 즉, LDPC 부호와 연관정 기반 신뢰도 전파 복호를 사용할 경우 RTT는 좋은 선택이 되지 못한다. 따라서, 본 논문에서는 RTT와 함께 사용되는 MO-RTT 또한 고려하지 않도록 한다.

그림 4는 OTT의 임계값 τ 를 바꿔가며 BER 성능

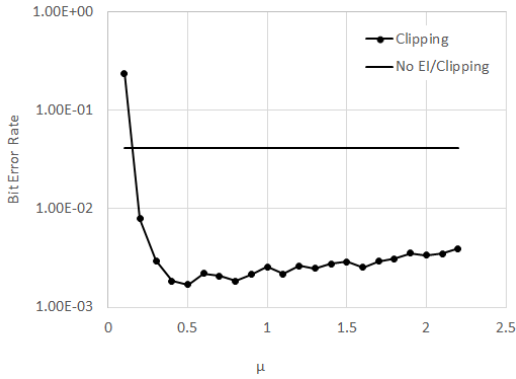


그림 5. 임계값 μ 의 변화에 따른 클리핑 기법의 성능 변화.
Fig. 5. Performance of clipping for various threshold μ values.

표 1. PBJ 환경에 따른 소실 삽입과 클리핑 기법의 임계값
Table 1. Thresholds of EI and clipping for various PBJ channels.

ρ	0.1	0.3	0.5
τ	3.4	2.3	6.5
μ	0.5	0.9	1.5

을 살펴본 것이다. 이 경우, $\tau=3.4$ 근처에서 가장 낮은 BER을 가지며, 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 사용하지 않은 경우보다 성능 이득을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 또한 마찬가지로 클리핑 기법의 임계값 $\mu=0.5$ 에서 가장 좋은 성능을 보이며, 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 사용하지 않은 경우 대비 성능 이득이 있다.

이러한 최적화 작업을 ρ 만 바뀌가며 수행한 임계값을 표 1에 나타내었다.

4.2 시뮬레이션 결과

이전 소단원에서 구한 임계값을 이용하여, 재밍 신호의 세기가 달라짐에 따른 소실 삽입 기법과 클리핑 기법을 도입한 시스템의 성능을 시뮬레이션 하였다. 임계값과 E_b/N_j 를 제외한 모든 파라미터는 이전 소단원에서 사용했던 것으로 동일하게 유지하였다. 또한, 참고를 위해 3회 반복 부호(3-repetition code)와도 비교하였다. 이 때, 반복 전송되는 심볼들이 서로 다른 홉을 통과하도록 길이 $3N$ 의 블록 인터리버를 사용하였다. 단, LDPC 부호의 경우 이전 소단원과 동일하게 인터리버는 사용하지 않았다. 3회 반복 전송 부호의 경우 부호율이 1/3로, LDPC부호보다 낮은 부호율을 갖는다.

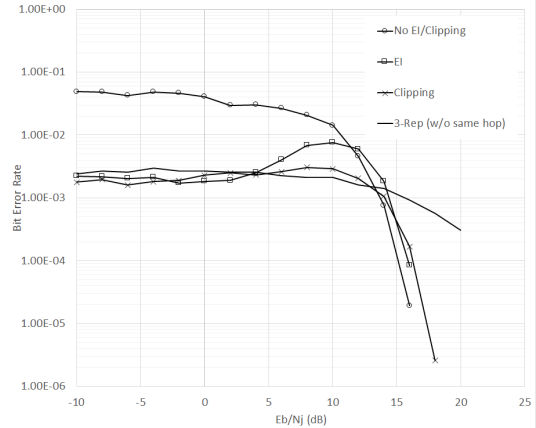


그림 6. 10%($\rho=0.1$) PBJ 채널에서의 성능 비교
Fig. 6. Performance comparison over 10% PBJ($\rho=0.1$) channel.

그림 6-8는 각각 10, 30, 50%, 즉 $\rho=0.1, 0.3, 0.5$ 일 때의 각 기법들의 성능을 나타낸다. 원형 포식이 소실 삽입이나 클리핑 기법을 적용하지 않았을 경우의 성능이고, 사각 포식이 소실 삽입 기법을 적용한 경우, X포식이 클리핑 기법을 적용한 경우이다. 실선은 3회 반복 부호의 성능을 나타낸다. 사용한 소실 삽입과 클리핑 기법의 임계값은 표 1과 같다.

그림 6은 $\rho=0.1$ 인 경우의 성능을 나타낸다. 우선 소실 삽입 또는 클리핑 기법이 적용되지 않을 경우 (No EI/Clipping)의 성능과 소실 삽입을 적용한 경우 (EI)를 살펴보면, 재밍 신호가 강한 E_b/N_j 영역에서 BER(bit error rate) 이득이 있다. 또한, 재밍 신호가 더욱 강해져도 BER이 하락하지 않는 특징을 보인다. 하지만 E_b/N_j 가 증가함에 따라, 점차 BER이 상승하는 현상을 보인다. 또한 높은 E_b/N_j 영역에서는 두 기법이 적용되지 않은 경우보다 성능 열화를 보인다. 이는, 재밍이 강할 경우 소실 삽입 기법이 효과적으로 작동하지만 점차 재밍 신호의 크기가 줄어들 경우 그 이득이 감소함을 의미한다. 이제 소실 삽입 기법과 클리핑 기법(Clipping)의 성능을 비교해 보자. 낮은 E_b/N_j 영역에서는 재밍 신호가 매우 커서 y_0 와 y_1 이 동시에 임계값을 넘기는 일이 많으므로 소실 삽입 기법과 클리핑 기법이 거의 비슷한 성능을 갖는다. 하지만 점차 E_b/N_j 가 증가하면 소실 삽입 기법에서 나타나는 BER 열화 현상은 클리핑 기법에서는 거의 나타나지 않는 장점을 보인다. 이후 높은 SJR 영역에서는 소실 삽입 기법과 마찬가지로 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 사용하지 않은 경우보다 성능 열화를 보인다.

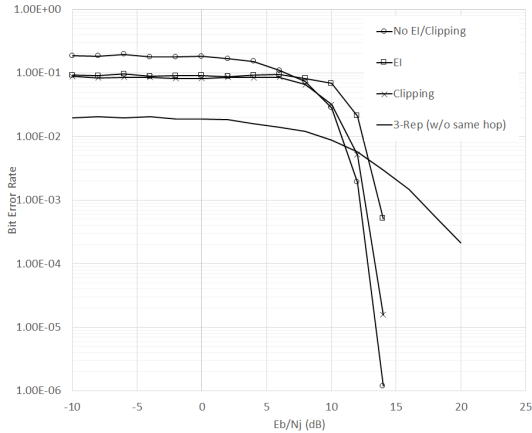


그림 7. 30%($\rho=0.3$) PBJ 채널에서의 성능 비교
Fig. 7. Performance comparison over 30% PBJ($\rho=0.3$) channel.

하지만 높은 E_b/N_j 영역에서 발생하는 이러한 성능 열화는 간단히 해결이 가능한데, 수신기는 우선 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 수행하지 않고 복호를 시도해 본다. 만약 복호에 실패하면 클리핑 기법을 적용하여 재 복호를 시도한다. 그러면 자연스럽게 클리핑 기법 적용 유무에 따른 BER 중 더 낮은 BER을 전 E_b/N_j 영역에 걸쳐서 달성할 수 있게 된다. 끝으로, 3회 반복 부호(3-Rep)와 클리핑 기법을 비교하면, 약 $E_b/N_j < 13dB$ 영역에서 두 기법은 비슷한 BER 성능을 갖는다. 이보다 높은 SJR 영역에서는 LDPC 부호가 점차 3회 반복 부호보다 좋은 성능을 보인다. 이는, 1/3부호율을 갖는 3회 반복 부호보다 더 빠른 전송 속도를 갖는 1/2부호율의 LDPC 부호에 클리핑 기법을 사용하는 것이 더 좋다는 것을 의미한다.

그림 7과 8은 각각 $\rho=0.3$, $\rho=0.5$ 인 경우를 나타낸다. $\rho=0.1$ 인 경우와는 다르게, 재밍 신호가 강하면 소실 삽입이나 클리핑 기법을 적용하더라도 3회 반복 부호보다 높은 BER을 보이게 된다. 이는, 재밍이 넓은 대역에 걸쳐 매우 크게 들어올 때에는 높은 부호율의 LDPC 부호에 소실 삽입 또는 클리핑 기법을 적용하기 보다는, 더 낮은 부호율의 부호를 사용하거나 송신 신호의 세기를 높이는 것이 효과적임을 의미한다.

위 실험들을 통해, LDPC 부호화된 FH BFSK 시스템을 PBJ 채널에 사용할 경우, 좁은 대역에 강한 재밍이 들어온다면 클리핑 기법을 사용하여 효과적으로 성능 향상을 이룰 수 있음을 알 수 있었다. 만약 재밍이 매우 강력하고 가용 자원이 많아서 넓은 대역에 매우 강하게 재밍을 가할 경우에는 송신 파워나 부호율

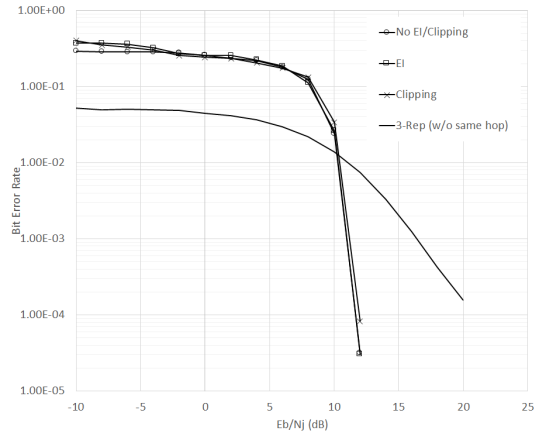


그림 8. 50%($\rho=0.5$) PBJ 채널에서의 성능 비교
Fig. 8. Performance comparison over 50% PBJ($\rho=0.5$) channel.

을 낮추지 않고 단순히 소실 삽입 또는 클리핑 기법만 적용해서는 좋은 성능을 얻을 수는 없음을 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 PBJ 채널 하에서 연관정 LDPC 부호를 FH BFSK 시스템의 성능 향상 기법에 대해 논의하였다. 우선 정관정 부호에 대해 기존에 제안되었던 소실 삽입 기법을 소개하고, 연관정 부호에 사용 가능한 클리핑 기법을 제안하였다. 실험 결과, 좁은 대역에 강한 재밍이 들어오면 소실 삽입 기법과 클리핑 기법이 비슷한 성능을 보이나, 재밍 신호가 약해짐에 따라 소실 삽입 기법은 BER 상승을 초래함을 확인하였다. 하지만 클리핑 기법은 이러한 현상을 보이지 않는 장점을 가짐을 보였다. 만약, 넓은 대역에 재밍 신호가 강력하게 들어올 경우에는 소실 삽입 기법이나 클리핑 기법에 의존하기 보다는 송신 신호를 높이거나 더 낮은 부호율의 부호를 사용해야 하는 점을 확인하였다.

References

- [1] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, Revised edition, McGraw-Hill, 1994.
- [2] S. K. Park, "Coded performance of FH/BFSK communication systems with partial band jamming," *J. KICS*, vol. 17, no. 8, pp. 837-

845, Aug. 1992.

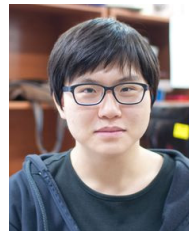
- [3] J.-K. Kwak and J.-S. Park, "Performance analysis of FH/CPFSK system with the error-correcting code and the diversity under rayleigh fading channel with the thermal noise and the partial-band noise jamming," *J. KICS*, vol. 21, no. 7, pp. 1787-1802, Jul. 1996.
- [4] A. J. Viterbi, "A robust ratio-threshold technique to mitigate tone and partial band jamming in coded MFSK systems," in *Proc. IEEE Milcom 1982*, vol. 1, Boston, USA, Oct. 1982.
- [5] B. M. Kang and H. Ryu, "Erasure decoding method of RS-convolutional concatenated code in frequency-hopping spread spectrum of partial band jamming environment," *J. KICS*, vol. 24, no. 12A, Dec. 1999.
- [6] S. Ahmed, L.-L. Yang, and L. Hanzo, "Erasure insertion in RS-Coded SFH MFSK subjected to tone jamming and rayleigh fading," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 56, no. 6, pp. 3563-3571, Nov. 2007.
- [7] H. A. Ngo, S. Ahmed, L.-L. Yang, and L. Hanzo, "Non-coherent cooperative communications dispensing with channel estimation relying on erasure insertion aided reed-solomon coded SFH M-ary FSK subject to partial-band interference and rayleigh fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 8, Aug. 2012.
- [8] D. J. C. Mackay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, pp. 399-431, Mar. 1999.
- [9] T. J. Richardson, M. A. Shokrollahi, and R. L. Urbanke, "Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 47, no. 2, Feb. 2001.
- [10] J. G. Proakis and M. Salehi, *Essentials of Communication Systems Engineering*, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [11] S. J. Johnson, *Iterative Error Correction*, Cambridge University Press, 2010.

박진수 (Jinsoo Park)



2009년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2009년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 석박사 통합
과정
<관심분야> 통신공학, 부호이
론, 전자전 통신

김인선 (Inseon Kim)



2012년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2012년 9월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 석박사 통합
과정
<관심분야> 통신공학, 부호이
론

송홍엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1986년 5월 : University of
Southern California Dept.
of EE. Systems 석사
1991년 12월 : University of
Southern California Dept.
of EE. Systems 박사
1992년 1월~1993년 12월 : Post-Doc Research
Associate, University of Southern California Dept.
of EE. Systems
1994년 1월~1995년 8월 : Senior Engineer, Qualcomm
Inc., San Diego, California.
2002년 3월~2003년 2월 : Visiting Professor,
University of Waterloo, Canada
1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론, 암호이론,
이산수학

양 필 웅 (Pilwoong Yang)



2010년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 졸업
2012년 2월 : 서울대학교 전기·
컴퓨터공학부 공학석사
2012년 3월~현재 : 서울대학교
전기·컴퓨터공학부 박사과정
<관심분야> LDPC 부호, 오류
정정부호, 통신시스템

한 성 우 (Sung Woo Han)



2000년 2월 : 충북대학교 컴퓨
터공학과 공학박사
2001년 8월~2002년 8월 : 미
육군무장연구소 교환연구원
1982년 10월~현재 : 국방과학연
구소 수석연구원
<관심분야> 통신공학, 대전자
전 통신, 군위성통신, Software Defined Radio,
Cognitive Radio

노 종 선 (Jong-Seon No)



1981년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 공학사
1984년 2월 : 서울대학교 대학
원 전자공학과 공학석사
1988년 5월 : University of Southern
California 전기공학과 공학박사

1988년 2월~1990년 7월 : Hughes Network Systems,
Senior MTS

1990년 9월~1999년 7월 : 건국대학교 전자공학과 부교수

1999년 8월~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 시퀀스, 협력통신, 시공간부호, 네트워크코
딩, LDPC 부호, OFDM, 이동통신, 암호학