

페이딩과 재밍 환경에서 LDPC 부호화된 OFDM/DS 시스템의 성능

Performance of LDPC Coded OFDM/DS Under Fading and Jamming Environment

서 동 철*
Seo, Dong-Cheul

이 우 찬*
Lee, Woo-Chan

김 종 훈*
Kim, Jong-Hun

ABSTRACT

In this paper, we verify the performance of LDPC coded OFDM/DS system by Monte-Carlo simulation of BER on Eb/No. The simulation results show that LDPC coded OFDM/DS has a strong anti-jamming characteristic over pulse-noise jammer and partial-band noise jammer.

The performance of LDPC coded OFDM/DS system is evaluated on both faded waveforms and non-faded waveforms. For non-faded waveforms, high coding gain is attained due to LDPC, even when waveforms have short PN sequence and JSR is only 5dB. Especially, the increase in the repeated number of LDPC decoding enhances coding gain.

However, faded waveforms cannot achieve sufficient average effect when PN sequence is short. High coding gain of faded waveforms can be achieved by extending length of PN sequence.

In addition, we compare LDPC coded OFDM/DS system with Convolutional coded OFDM/DS system. The simulation results illustrate that when LDPC coded OFDM/DS system with short PN sequence has sufficient average effects, the system shows lower BER than Convolutional coded OFDM/DS system with long PN sequence.

주요기술용어(주제어) : LDPC(Low Density Parity Code), OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), PN(Pseudo-Noise), JSR(Jammer to Signal power Ratio), DS(Direct Sequence), BER(Bit Error Rate), Eb/No(Energy Per Bit to Noise Spectral Density Ratio)

1. 머리말

미래 우리군의 전술통신체계인 전술 종합 정보통신

체계(TICN : Tactical Information Communicaton Network)는 SPIDER 체계의 단점인 링크 용량을 증대시킬 것으로 판단된다. 링크용량을 증대시키는 변조 기술로 최근 OFDM(Othogonal Frequency Division Multiplexing)이 주목받고 있다. OFDM은 4세대 이동통신의 후보기술로 대역폭 효율이 우수하고 페이딩에 강한 특성을 가지고 있다.

† 2008년 6월 16일 접수~2008년 8월 22일 게재승인

* 육군사관학교(Korea Military Academy)

주저자 이메일 : eemasseo@kma.ac.kr

그러나 OFDM은 적대적인 전파환경하에서 운용하기에는 어려움이 따른다. OFDM은 서로 직교하는 다수의 부반송파를 같은 시간에 전송하는 방법으로 의도적인 전파 간섭인 재밍에 약한 특성을 보인다. 따라서 OFDM은 재밍에 대항할 수 있는 대역확산(SS : Spread Spectrum) 및 채널부호와 결합하여 사용해야 한다. 참고문헌 1, 2는 다양한 재밍환경에서 OFDM 시스템과 대역확산 또는 대역확산 및 채널 부호화 기법을 결합하여 성능을 평가하였다. 참고문헌 1에서는 채널부호로 터보코드를 사용하였고 참고문헌 2는 길쌈부호를 사용하였다. 참고문헌 1은 터보코드와 대역확산을 OFDM에 적용해서 AWGN(Additive White Gaussian Noise)과 높은 JSR을 갖는 재밍환경에서도 높은 부호이득을 얻을 수 있음을 보여주었다. 그러나 이 방법은 터보코드 복호기의 높은 복잡성과 충분한 인터리빙에 의한 지연시간이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 터보코드와 같이 우수한 부호이득을 갖으면서, 터보코드에 비해서 여러 가지 장점을 가지는 LDPC(Low Density Parity Check) 부호를 OFDM에 적용하여 AWGN과 재밍환경에서의 성능뿐만 아니라 페이딩과 재밍환경하에서의 성능도 확인하였다.

시뮬레이션에서 사용한 성능 측정기준인 비트오류율은 LDPC 부호화된 OFDM에 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)기법을 결합(OFDM/DS)하여, 재머와 페이딩 채널환경에서 몬테 카를로 시뮬레이션으로 측정하였다. 재머는 부분대역 잡음 재머와 펄스 잡음 재머로 모의하였다. LDPC는 부호율 1/2, 패리티 검사부호 행렬이 (256,512)인 부호를 사용하였다. 여기서 256은 부호화기에 입력되는 원 데이터를 나타내며, 512는 부호기에서 출력되는 부호어(codeword)를 나타낸다. 또한, 시뮬레이션에서 수신기는 수신신호에 대해 완전하게 동기화를 획득하고, 주파수 오프셋은 없는 것으로 가정하였다.

논문은 2장에서 LDPC, 재머 형태, 항재밍 기법에 대한 관련연구 내용을 간략하게 제시하고, 3장에서 시뮬레이션 모델 부분을 송신기, 재머와 채널모델, 수신기 구조로 구분해서 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 모델에 의한 시뮬레이션을 실시한 결과를 제시하였고, 5장에서는 결론을 제시하였다.

2. 관련 연구

가. LDPC 부호

LDPC부호는 1960년대 초 Gallager의 박사 논문으로 발표되었으며, 샤논의 한계(Shannon's Limit)에 근접하는 블록부호의 일종이다. LDPC는 1의 수가 극히 적은 희소행렬을 패리티 검사 비트 행렬로 이용해서 AWGN 채널에서 높은 성능을 보여 주었다. 그러나 LDPC 부호는 높은 복잡성으로 당시에 큰 주목을 받지 못했다. 그러나 최근 구형기술들의 발달과 높은 성능으로 다시금 주목받고 있다. LDPC 부호는 디지털 비디오 방송(DVB-S2), 와이맥스(WiMAX) 등에 응용하고 있으며 높은 부호이득과 적응 부호율 적용 가능 부호로 4세대 이동통신에 적용되어 사용될 것이다.

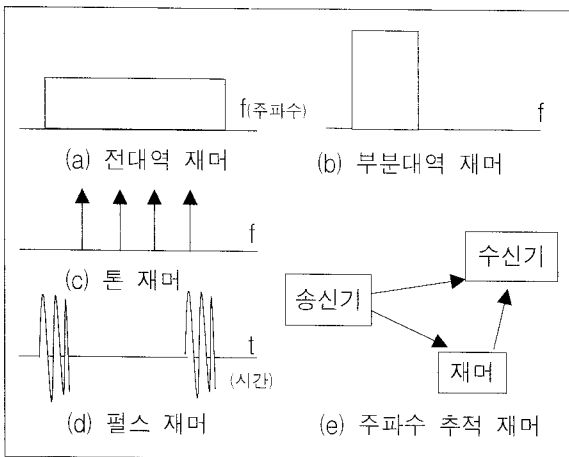
LDPC 부호가 갖는 이점은 다음과 같다. 첫째, 높은 부호이득(Coding Gain)을 갖고 있다. 이진 대칭채널(BSC : Binary Symmetric Channel)에서 터보코드와 더불어 샤논의 한계에 근접하는 부호이다. 둘째, 상대적으로 단순한 복호기 구조를 가지고 있다. 이는 터보코드의 복잡성에 비해 단순하며, 높은 속도의 응용에 적용 가능하다. 특히 터보코드를 적용하기 어려운 데이터 저장매체에도 적용이 가능하다. 셋째, 수학적으로 해석이 용이하다. 넷째, 특히기간이 경과 되었다. 다섯째, 터보코드에 비해서 오류검색이 쉽다. 이는 단순하게 수신 부호어와 패리티 검사 행렬의 곱으로 확인 가능하다. 즉 $H \cdot C = 0$ 이면 오류가 없는 것으로 판단한다. 여기서 H는 패리티 검사 행렬, C는 수신 부호어를 나타낸다. LDPC부호는 AWGN과 페이딩 채널에서도 좋은 성능을 갖고 있으며, 병렬채널에서 사용이 용이한 것으로 알려져 있어서 OFDM과 결합해서 많이 사용하고 있다. LDPC부호는 패리티 검사 행렬이 클수록 그리고 복호시 반복횟수가 클수록 더 좋은 성능을 갖는다.

그러나 본 논문에서는 LDPC는 구속장 길이(Constraint Length)가 9이고 부호율이 1/2인 길쌈부호(Convolutional Code)와의 부호성능의 차이를 확인하고, 페이딩과 재머의 전파방해 환경하에서 강인성을 확인하는 것이 목적이므로 비교적 작은 길이의 LDPC 패리티 검사 부호를 사용하였다.

나. 재머 형태

재머는 의도적으로 타인의 전자기파 사용을 방해하기 위해 간섭파를 방사하는 장치이다. 재머는 디지털화된 전장에서 중요한 역할을 수행하고 있다. 특히 재머는 현대 복합체계들의 연결고리를 담당하는 통신체계를 무력화시킬 수 있는 수단이다. 따라서 전장에서 적(敵)은 아군의 C4ISR-PGM에 의한 전투력 승수(Multiply) 효과를 감소시키기 위해서 재머를 적극적으로 이용할 것으로 판단된다. 이런 적의 재머에 의한 반작용으로 항 재밍(Anti-Jamming) 기술들이 개발되고 있다. 따라서 열악한 전장환경에서 아군의 통신체계를 보호하기 위해서는 항 재밍 기술이 필수적으로 갖추어져야 한다. 항 재밍 기술을 알아보기 전에 아군 통신체계에 위협이 되는 재머의 종류에 대해서 알아보겠다.

그림 1은 각 재머의 종류에 대한 도식적 표현이다. 재머의 종류는 전 대역 재머, 부분대역 재머, 톤 재머, 펄스 재머, 주파수 추적 재머 등이 있다. 전 대역 재머는 신호의 전 대역에 대해서 전파방해를 할 수 있는 재머를 말한다. 부분대역 재머는 전 대역 재머와 달리 신호의 일부대역에 대해서 전파방해를 가한다. 이렇게 함으로써 특정대역에서 더 높은 재머의 전력 스펙트럼밀도(PSD : Power Spectrum Density)로 신호의 정상 수신을 방해한다. 펄스 재머는 부분대역과 쌍대성으로 하나의 심볼 지속시간의 일부시간 동안은 높은 피크 전력으로 신호를 방해하고, 그 외 시간은



[그림 1] 재머 종류

전력을 전송하지 않는다. 톤 재머는 주파수 영역에서 단일 톤, 다중 톤으로 신호의 수신을 방해한다. 주파수 추적 재머는 스마트 재머로서 상대방 송신신호의 특성을 추출해서 전파방해를 위한 파형을 생성 및 방사하여 수신기의 수신을 방해하는 방법이다. 본 논문에서 적용한 재머는 부분대역 재머와 펄스 재머이며, 이들을 LDPC 부호화된 OFDM/DS에 추가하여 성능 변화를 확인하였다.

다. 항 재밍 기법

아래 표 1은 항 재밍 종류와 효과를 나타내고 있다.

[표 1] 항재밍 종류와 효과

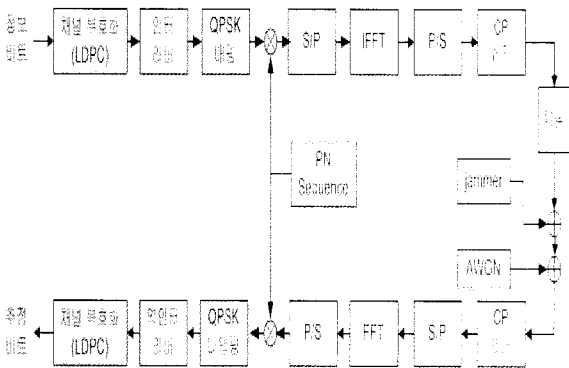
| 구분 | DSSS | FHSS | 클리핑 | 필터링 |
|----|------|------|---------|---------|
| 효과 | 평균화 | 회피 | 재밍신호 제한 | 재밍신호 제거 |

군용 통신에서 많이 사용하고 있는 대표적인 항 재밍 기법은 대역확산 기법이다. 대역확산 기법은 DSSS, FHSS, DS/FH 등이 있다. DSSS은 부분대역 잡음에는 강인하나 펄스재머에는 약한 특성이 있다. 반면 FHSS는 부분대역 재머에는 약한 특성이 있으나 펄스재머에는 강인하다. DS/FH는 DSSS와 FHSS을 결합하여 사용하는 방식으로 많은 통신자원을 소비하지만 다양한 재머에 대처할 수 있는 방법이다.

다른 방법으로 채널 부호화와 인터리버를 이용하는 방법, 클리핑 및 이레이저, 필터링 등을 이용하는 방법이 있다. 채널 부호화와 인터리버는 단독으로 사용되지 않고 일반적으로 대역확산 또는 클리핑 및 이레이저와 결합하여 사용한다. 클리핑은 어떤 임계치 이상의 수신신호를 제한하는 방법으로 하드 리미터와 소프트 리미터를 이용하여 구현한다. 이레이저는 재밍신호로 의심되는 수신신호를 복조 및 복호시 사용하지 않는 방법이다. 필터링은 재밍의 특성을 알고 있을 때 노치필터(Notch Filter)나 중앙값 필터(Median Filter)를 이용해서 방해신호를 제거하는 방법이다. 논문은 군용통신에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 DSSS을 부호화된 OFDM과 결합하여 재머에 대한 강인성을 평가하였다.

3. 시뮬레이션 모델

아래 그림은 LDPC 부호화된 OFDM/DS 시스템에 대한 모델이다.



[그림 2] LDPC Coded OFDM/DS 시뮬레이션 모델

가. 송신기

송신기는 무작위로 발생하는 정보비트를 부호율 1/2 인(256,512) LDPC 채널 부호화기로 입력한다. 256비트의 정보비트가 입력되어 512비트의 부호어로 부호화된다. 부호화된 부호어는 페이딩 채널과 부분대역 재머에 의해서 일부 구간에서 연접오류(Burst Error)가 발생할 수 있다. 따라서 LDPC 부호의 오류정정을 위해서 랜덤 인터리버를 사용해서 연접오류 발생을 방지한다. 인터리버된 데이터는 QPSK변조기를 통해서 2비트의 입력데이터가 4개의 가능한 심벌로 매핑된다. 매핑된 데이터는 의사잡음(PN) 시퀀스로 확산된다. 확산된 데이터는 직렬 병렬 변환기(S/P : Serial to Parallel)를 통해서 병렬 데이터로 변환되고, 이 데이터들은 IFFT로 입력되어 시간영역의 심벌로 변환된다. 출력신호는 P/S를 통해서 시간영역의 직렬데이터로 변환된다. IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 후 송신신호는 식 (1)과 같다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (1)$$

$$n, k = 0, 1, 2 \dots N-1$$

여기서 $x(n)$ 은 시간영역에서 OFDM 심벌의 표본값

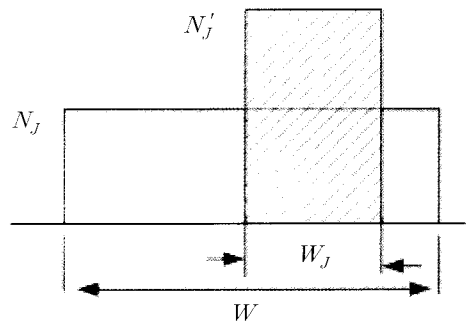
을 나타내고, $X(k)$ 는 IFFT에 입력되는 주파수 영역에서 값을 나타낸다. N 은 부반송파의 수를 나타낸다.

OFDM 심벌의 심벌간 간섭(ISI : InterSymbol Interference)과 직교성 유지를 위해서 순환 프리픽스(CP : Cyclic Prefix)를 추가한다. 순환 프리픽스는 심벌 끝부분의 일부 신호를 심벌의 앞쪽에 삽입하는 것을 말한다.

나. 채널, 재머, AWGN 모델

채널은 Rayleigh 페이딩 채널을 사용하였고, 채널의 임펄스 응답은 수신기 구조에서 제시하였다.

재머 모델은 부분대역 잡음 재머와 펄스잡음 재머 모델을 사용하였다. 부분대역 재머는 전체 신호 대역폭에 대해서 방해하지 않고 신호 대역폭의 일부분에 대해서만 방해를 한다. 따라서 재머는 신호의 전체 대역폭을 방해할 때보다 더 높은 전력스펙트럼 밀도를 갖고 신호에 영향을 미친다. 아래 그림은 부분대역 재머와 전체대역 재머에 대한 전력스펙트럼밀도(PSD)에 대해서 나타내고 있다.



[그림 3] 전대역 재머와 부분대역 재머 PSD

전체대역 재머의 PSD : $N_J = \frac{J}{W}$ (2)

부분대역 재머의 PSD : $N'_J = \frac{J}{W_J} = \frac{J}{(W/\rho)} = \frac{N_J}{\rho}$ (3)

여기서 ρ 는 JFR(Jammer Fractional Ratio, 부분대역 재머 대역폭과 전체대역 재머 대역폭의 비)이라 하며, $0 \leq \rho = \frac{W_J}{W} \leq 1$ 의 범위를 갖는다.

시뮬레이션에서 부분대역 재머를 모의하기 위해서, 부반송파의 일부에 AWGN 잡음을 추가하였다. 예를 들어 256개의 부반송파를 IFFT 및 FFT에서 사용하고 JFR(Jammer Fraction Ratio) ρ 가 0.2인 경우, 부분대역은 전체 256개의 부반송파 중 51개의 부반송파를 차지한다. 부분대역 재머는 동상 및 직교 성분에 대해서 각각 평균이 0이고 표준편차가 σ_j 인 분포를 갖는다.

펄스 잡음 재머는 부분대역 잡음 재머와 달리 시간 영역에서 재머의 최대전력을 어느 일정시간(τ)에 전송하고 그 외 시간에는 전송하지 않는다. 이를 주기(T)적으로 반복한다. 듀티 사이클(Duty Cycle : $\frac{\tau}{T}$) = ρ 인 경우, 최대전력은 $\frac{J}{\rho}$ 가 된다. 시뮬레이션에서는 균일분포 랜덤변수로 발생시킨 난수가 ρ 값보다 작다면 최대전력이 $\frac{J}{\rho}$ 인 펄스 잡음 재머를 발생시켜서 하나의 OFDM 심볼구간에 대해서 펄스 잡음 재밍을 한다. 반면, 발생시킨 난수가 ρ 값보다 크다면 펄스 잡음 재머를 발생시키지 않고 해당 OFDM 심볼에 영향을 미치지 않는다. AWGN은 열잡음이고, 동상과 직교성분에서 각각 평균이 0이고 표준편차가 σ_n 인 분포를 갖는다.

다. 수신기

수신기는 수신신호에서 ISI와 직교성 유지를 위해서 삽입된 순환 프리픽스를 제거한다. FFT에 입력되는 신호의 형태는 페이딩 채널 통과 여부에 따라서 2가지 경우 구분했고, 각각의 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하고 성능을 확인하였다.

- (1) 페이딩 채널을 고려하지 않은 경우 수신신호

$$r(n) = x(n) + j(n) + w(n) \tag{4}$$

- (2) Rayleigh 페이딩 채널을 통과한 수신신호

$$r(n) = x(n) \otimes h(n) + j(n) + w(n) \tag{5}$$

여기서 $h(n)$ 은 Rayleigh 페이딩 채널 임펄스 응답으로 직교성분과 동상성분이 각각 가우시안 분포를 갖고 평균이 0이고 표준편차 σ_h 를 갖는다. \otimes 은 컨볼루션을 나타내며, $j(n)$ 은 부분대역 잡음 재머 또는 펄스

잡음 재머, $w(n)$ 은 AWGN을 나타낸다.

수신기의 FFT 후 주파수영역에서의 수신된 신호는 아래와 같다.

$$R(k) = X(k)H(k) + J(K) + W(K) \tag{6}$$

여기서 $R(K), H(K), J(K), W(K)$ 은 $r(n), h(n), j(n), w(n)$ 의 FFT 후 주파수 영역의 데이터 이다.

FFT 후의 수신신호는 P/S에서 직렬데이터로 변환되며, 확산시에 사용한 동일한 PN 시퀀스로 역 확산된다. 역 확산 후 역 인터리버, LDPC 복호기의 처리를 통해서 원 신호로 복원된다.

라. 시뮬레이션 모델에 적용한 파라미터

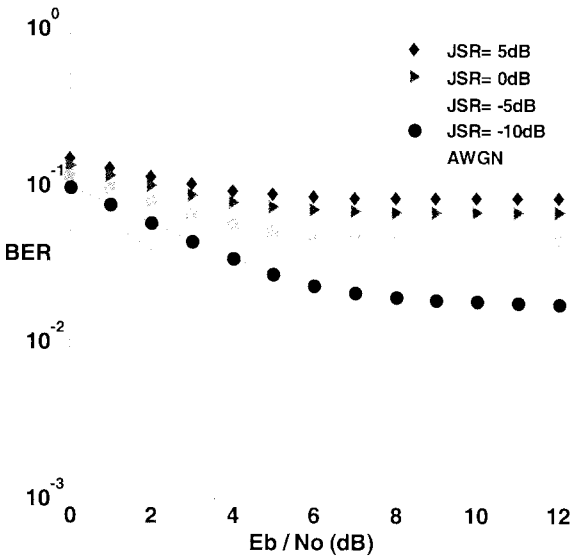
[표 2] 시뮬레이션 파라미터

| 파라미터 | 내용 |
|------------------|---------------------------------|
| IFFT/FFT 길이 | 256 |
| 부반송파 수 | 256 |
| 유효 심볼구간 (T) | 3.2 μ s |
| 보호구간(T_g) | 0.8 μ s |
| 전체 심볼구간(T_s) | 4 μ s |
| 매핑 방식 | QPSK |
| 채널 부호화/복호화 | LDPC(256,512), 복호화시 반복횟수 10회 |
| 채널 인터리버 | 랜덤 인터리버 |
| 채널환경 | AWGN, Rayleigh 페이딩 채널 |

4. 시뮬레이션 결과

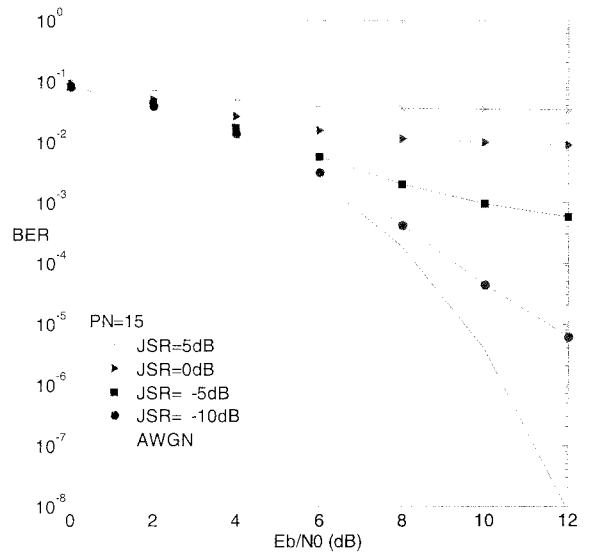
가. 대역확산 및 부호화가 없는 OFDM의 성능
앞에서도 언급했지만 대역확산 및 부호화가 없는 OFDM은 부분대역 및 펄스 잡음 재머에 약한 특성을 보인다. 그림 4와 6은 신호대 잡음비에 대한 비트 오류율(BER)을 나타내고 있다. JSR은 재머전력 대

신호전력비를 나타낸다. 위의 그림에서 JSR이 -10dB 인 경우, 즉 신호전력이 재머전력 보다 10배이상 높은 경우에도 비트오류율이 10^{-2} 보다 작으며, Eb/No이 증가하더라도 성능은 향상되지 않는다.

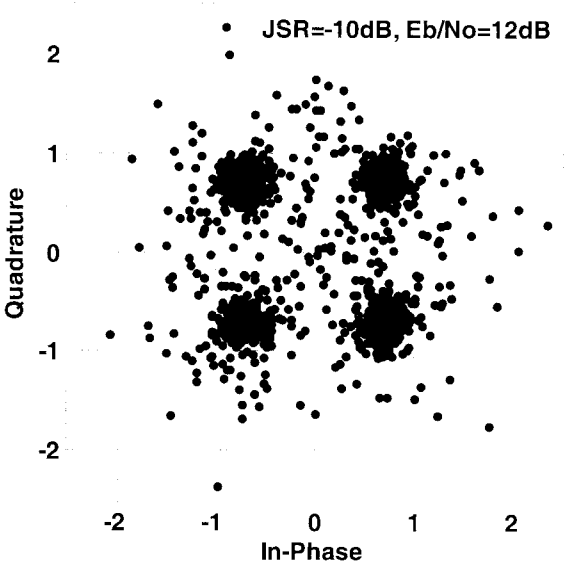


[그림 4] 부분대역 재머($\rho=0.2$)와 AWGN에서 OFDM 성능

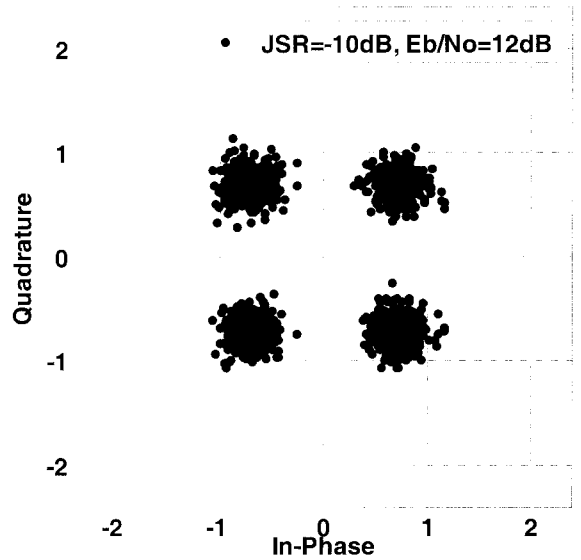
따라서 재머는 항 재밍 기능을 갖지 않는 OFDM 시스템에 대해서 치명적인 성능저하를 일으킨다. 부가적으로 JSR이 -10dB, Eb/No이 12dB인 경우 FFT 후 QPSK 신호 정상도를 그림 5로 나타냈다. 그림 5



[그림 6] 부분대역 재머($\rho=0.2$)와 AWGN에서 OFDM/DS(PN=15) 성능



[그림 5] 부분대역 재머($\rho=0.2$)와 AWGN에서 OFDM 수신신호 분포도

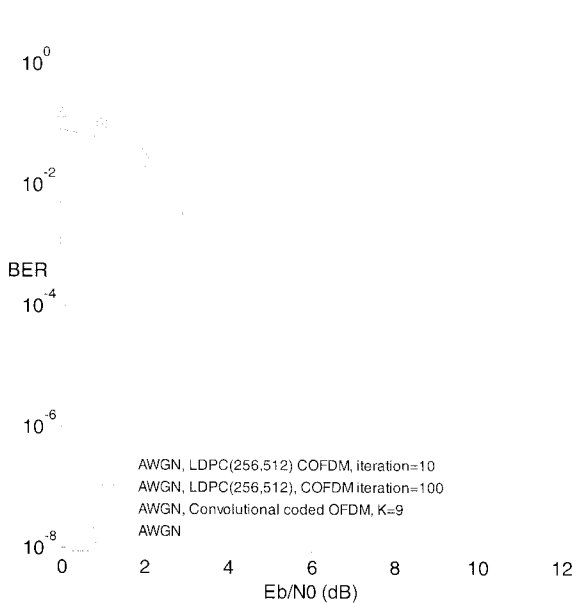


[그림 7] 부분대역 재머($\rho=0.2$)와 AWGN에서 OFDM/DS 수신신호 분포도

에서 보듯 높은 신호대 잡음비에서 부분대역 잡음 재머에 의해서 전파방해를 받은 부분송파의 신호대역의 데이터들이 신호 정상도의 원 데이터 위치에서 많이 벗어나 분포되어 있음을 가시적으로 확인할 수 있다. 그림 6은 OFDM에 PN 시퀀스(m 시퀀스 사용)를 이용해서주파수 영역에서 확산한 경우의 성능곡선을 나타낸다. PN 시퀀스는 길이가 15이며, 짧은 PN 시퀀스에서도 평균화 효과를 볼 수 있음을 그림 6의 성능곡선과 그림 7의 신호 정상도에서 확인할 수 있다.

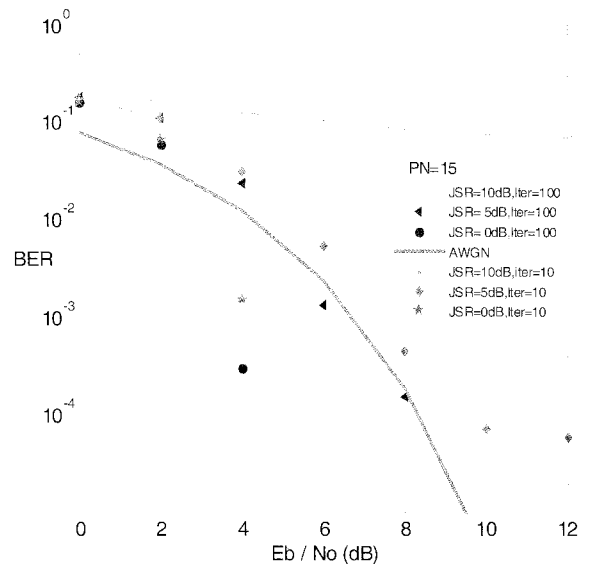
부호화 하지 않은 OFDM/DS 성능은 JSR이 증가할수록 AWGN에서의 OFDM 성능에 근접함을 알 수 있다. 또한 가시적으로 신호 정상도를 보면, 역 확산에 의해서 수신신호가 원 신호 정상도에 밀집되어 있음을 볼 수 있다.

나. 재밍과 AWGN 환경에서 부호화된 OFDM성능 대역확산은 전송신호를 원 신호 대역폭보다 더 넓은 대역폭으로 확산 시켜주고, 재머 및 잡음에 의해서 영향을 받고 수신된다. 수신된 신호는 원 신호를 확산시킬 때 사용한 동일한 PN 시퀀스로 역 확산한다. 대역확산에서 얻어지는 이득은 역 확산에 의한 평균화 이득이다. 부호화와 인터리버에 의해서 역시 평균화 이득과 부호화 이득을 얻게 된다. 이를 통해서 OFDM

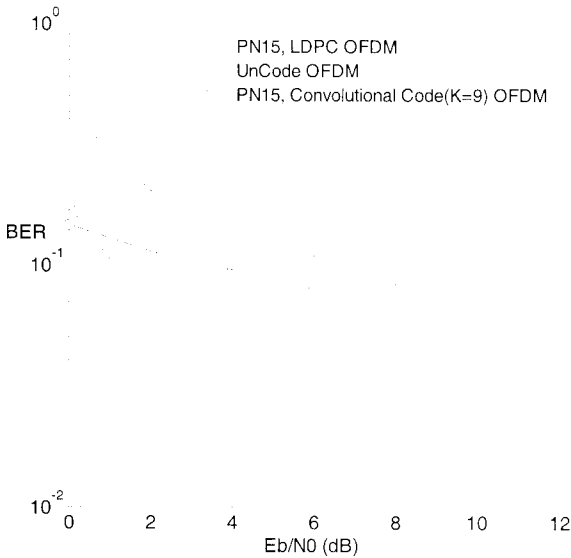


[그림 8] AWGN에서 LDPC와 길쌈부호의 성능비교

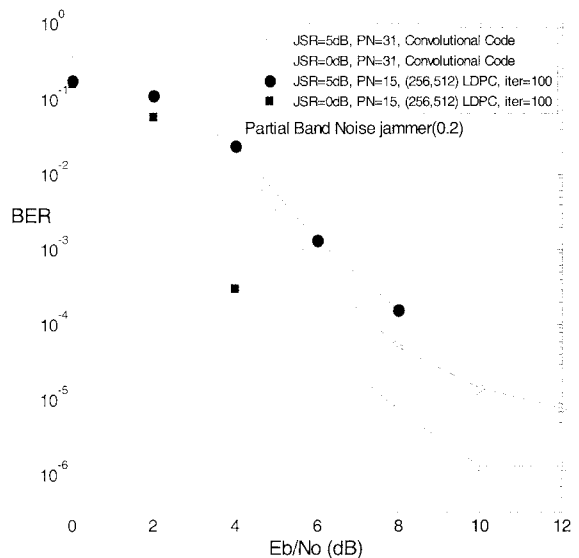
시스템은 강력한 항 재밍 효과를 갖게 된다. 그러나 대역확산과 부호화로 인해서 OFDM 시스템은 더 넓은 전송 대역폭이 필요하거나 또는 원래의 전송속도가 감소된다. 그림 8은 재밍이 없는 AWGN에서 LDPC 부호화된 OFDM과 길쌈부호로 부호화된 OFDM에 대한 성능을 나타내고 있다. 길쌈부호의 복호화 방법은 경판정(Hard Decision)을 이용했다. 그림 8에서 보듯 LDPC 부호화된 OFDM이 길쌈부호로 부호화된 OFDM보다 성능이 우수함을 알 수 있다, 또한 LDPC 복호횟수가 10에서 100으로 증가해서 부호이득이 향상됨을 확인할 수 있다. 그림 9는 부분대역 잡음 재머와 AWGN이 동시에 페이딩 채널을 거치지 않은 송신신호에 영향을 미치는 경우에 LDPC 부호화된 OFDM/DS의 성능을 보였다. 그림 9에서 보듯 JSR이 10dB로 재머의 영향이 큰 경우, PN 시퀀스가 15로 평균화 효과를 볼 수 없었다. 따라서 JSR이 10dB에서 평균화 효과를 볼 수 없어서, 그 뒤에 처리되는 복호화시에도 전혀 부호이득을 볼 수 없음을 확인할 수 있다. 그러나 JSR이 5dB에서는 PN시퀀스 15로도 평균화 효과를 볼 수 있으며, 그 뒤에 처리되는 복호화시에도 부호이득을 얻을 수 있음을 성능곡선으로 확인할 수 있다.



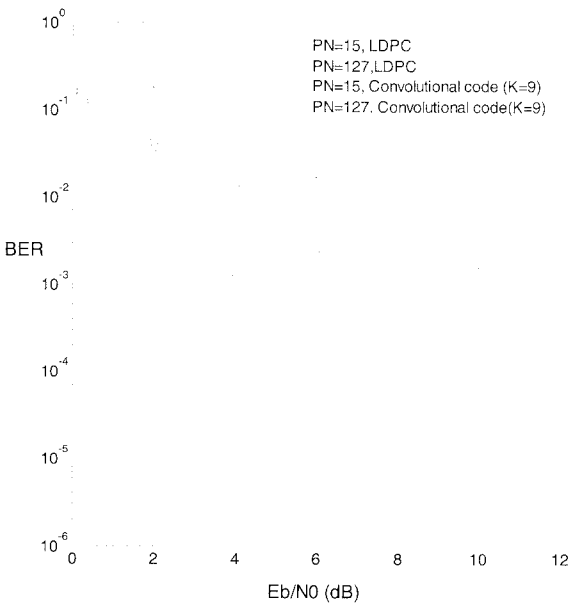
[그림 9] 부분대역 잡음 재머($\rho=0.2$), 반복횟수가 10과 100인 경우의 성능비교



[그림 10] 펄스 잡음 재머($\rho=0.2$, JSR=5dB)에서 PN 시퀀스 15에서 COFDM과 OFDM 성능비교



[그림 12] LDPC Coded OFDM/DS(PN=15)와 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS(PN=31) 성능비교



[그림 11] 펄스 잡음 재머($\rho=0.2$, JSR=0dB), (256,512) LDPC(반복횟수 10)와 컨볼루션 부호(구속장 길이 K=9) 성능비교

JSR이 0dB로 신호전력과 재머전력이 같아지는 경우에는 AWGN에서 얻을 수 있는 성능곡선 보다도

더 우수한 성능곡선을 얻을 수 있는데, 이는 JSR이 낮을수록 성능이 개선되기 때문이다. 또한 그림 8에서 LDPC 복호화시 반복횟수가 10에서 100으로 증가시에 역시 부호이득이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 10은 펄스 잡음재머(JSR=5dB)와 AWGN이 송신신호에 영향을 미치는 경우의 성능곡선이다. JSR이 5dB에서 LDPC 부호화된 OFDM/DS는 부호화하지 않는 OFDM에 비해서 성능향상은 있으나, 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS는 더 나쁜 성능을 보이고 있다. 이는 JSR이 열악한 펄스잡음 재머환경에서는 PN 시퀀스의 길이가 15로 짧아서 충분한 평균화 효과를 복호기에 전달해 주지 못하기 때문이다.

그러나 그림 11에서 보듯, JSR이 0dB로 개선된 경우, PN 시퀀스가 15이어도 충분히 LDPC나 길쌈부호로 인한 부호이득을 얻을 수 있다. 그리고 PN시퀀스가 127를 사용한 경우 PN시퀀스 15보다 평균화 효과의 증대로 더 높은 부호이득을 얻을 수 있다.

그림 9와 그림 10을 비교해서 볼 때, 펄스 잡음 재머가 LDPC 부호화된 OFDM/DS 시스템을 부분대역 잡음 재머 보다 더 성능을 저하시킴을 알 수 있다. 또한 그림 10과 11은 LDPC 부호화된 OFDM/DS가 펄스잡음재머에서도 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS

보다 더 좋은 부호이득을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

그림 12는 PN 시퀀스가 15인 LDPC 부호화된 OFDM/DS와 PN 시퀀스가 31인 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS에 대해서 부분대역 잡음재머와 AWGN에서의 성능을 나타내고 있다. LDPC 부호화된 OFDM/DS는 JSR이 5dB에서도 PN 시퀀스가 작더라도 LDPC 부호이득으로 충분히 PN시퀀스의 평균화 효과를 보상하고 있음을 그림을 통해서 알 수 있다. 또한 JSR이 0dB에서는 LDPC 부호화된 OFDM/DS가 더 긴 길이의 PN 시퀀스 가진 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS보다 더 좋은 성능을 갖는다.

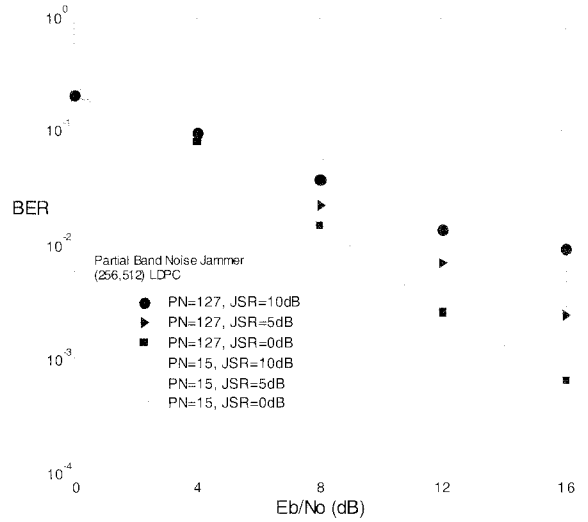
다. 페이딩, 재밍, AWGN에서 COFDM/DS 성능

그림 13은 Rayleigh 페이딩 채널을 거친 신호가 부분대역 잡음 재머 의해서 방해받고 부가적으로 AWGN이 더해진 경우 부호화된 OFDM/DS에 대해서 성능을 나타내고 있다. 그림 13에서 보듯 Rayleigh 페이딩 채널을 거친 신호는 PN시퀀스가 15인 경우 JSR이 낮아지는데도 평균화 효과 및 부호이득에 의한 성능개선이 크게 나타나지 않는다. 따라서 성능개선은 PN시퀀스를 127로 크게 해준 경우, 재머전력을 역 확산을 통해서 전체대역으로 넓혀줌으로서 성능개선이 PN시퀀스가 15인 경우보다 크게 나타난다.

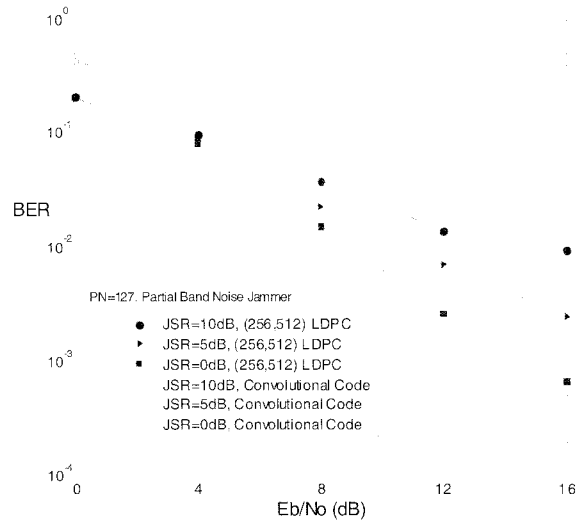
따라서 페이딩 환경과 같이 신호의 크기의 변동이 큰 경우, 재머에 의한 성능저하는 크게 나타나며, 이를 방지하기 위해서는 더 긴 PN시퀀스가 필요함을 알 수 있다. 그림 14와 15는 페이딩 채널을 거친 신호가 재머에 의해서 방해받고, AWGN이 더해진 경우 LDPC 부호화된 OFDM/DS의 성능과 길쌈부호로 부호화된 OFDM의 성능을 나타내고 있다.

그림 14와 15에서 보듯 LDPC 부호화된 OFDM/DS가 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS보다 열악한 JSR에서도 높은 성능을 가지고 있음을 보여주고 있다.

그림 16은 LDPC 부호화된 OFDM/DS 신호가 페이딩 채널을 통과하고, 부분대역 잡음재머 또는 펄스 잡음재머에 의해서 방해 받는다. 최종적으로 수신기에서 AWGN이 더해진 경우의 성능을 비교한 그림이다. 그림에서 보듯, Eb/No가 개선될 수록 펄스 잡음재머가 부분대역 잡음 재머 보다 LDPC 부호화된



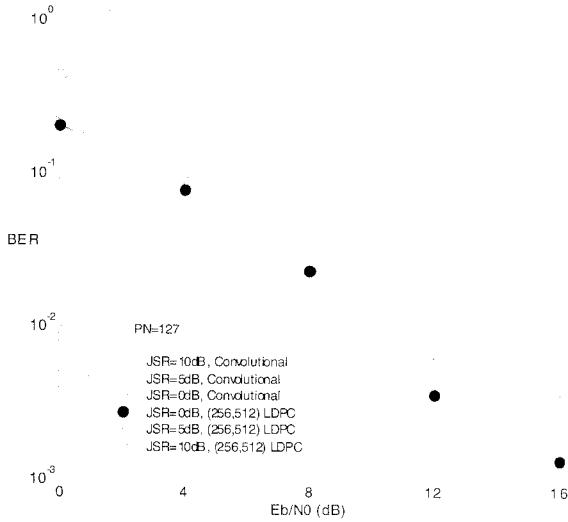
[그림 13] 부분대역 잡음 재머($\rho=0.2$)에서 PN 시퀀스의 평균화 효과



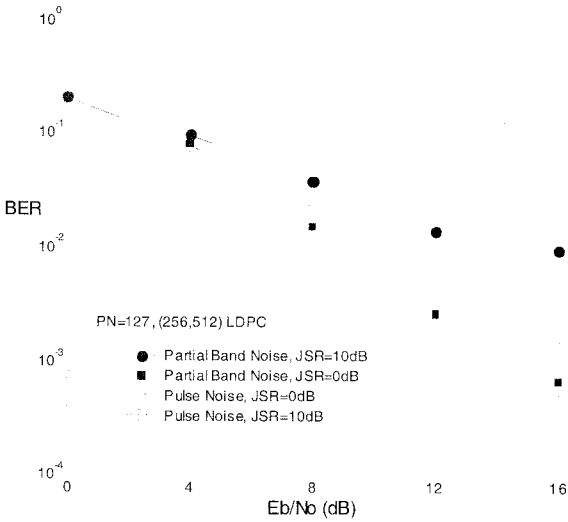
[그림 14] 부분대역 잡음 재머($\rho=0.2$)에서 LDPC 부호화된 OFDM/DS와 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS

OFDM/DS의 성능을 저하시킨다. 이는 PN 시퀀스에 의한 평균화 효과가 펄스 잡음 재머보다 부분대역 잡음 재머에서 크게 나타남을 보여주고 있는 것이다.

그림 17은 Rayleigh 페이딩 채널과 부분대역 잡음 재머에서 PN 시퀀스가 127인 LDPC 부호화된

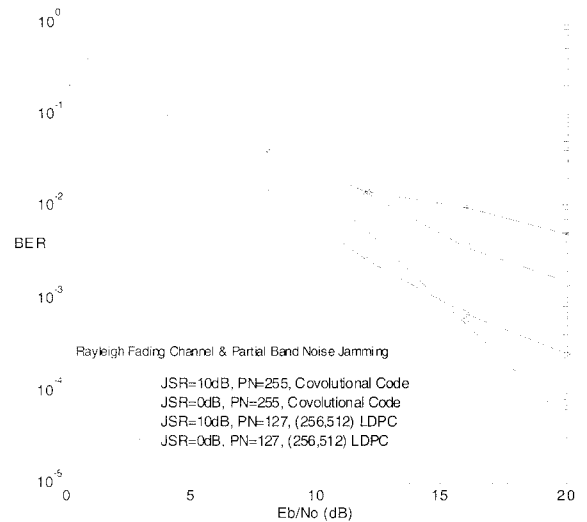


[그림 15] 펄스 잡음 재머($\rho=0.2$)에서 LDPC 부호화된 OFDM/DS와 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS



[그림 16] LDPC 부호화된 OFDM/DS에서 부분대역 잡음 재머와 펄스 잡음 재머에서의 성능비교

OFDM/DS와 PN 시퀀스가 255인 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS의 성능을 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯, E_b/N_0 이 12dB 이하에서는 LDPC로 부호화된 OFDM/DS의 성능이 더 우수하고, E_b/N_0 이 개선될수록 긴 길이의 PN 시퀀스를 가진 길쌈부호로 부호화된 OFDM/DS가 우수하다.



[그림 17] Rayleigh 페이딩 채널과 부분대역 잡음 재머($\rho=0.2$)에서 PN시퀀스 127의 LDPC 부호화된 OFDM/DS와 PN 시퀀스 255의 길쌈 부호로 부호화된 OFDM/DS

5. 맺음말

논문에서는 LDPC 부호화된 OFDM/DS의 성능을 부분대역 잡음 재머와 펄스 잡음 재머에서 확인하였고, 재머에 대항할 수 있는 강력한 항재밍 효과가 있음을 성능곡선으로 확인할 수 있었다. 논문에서 확인된 결과를 정리하면 아래와 같다.

첫째, LDPC 부호화된 OFDM/DS는 페이딩 채널을 거치지 않는 신호의 경우, 짧은 PN 시퀀스에서도 높은 부호이득을 얻을 수 있었다. 특히 복호시 반복횟수가 클수록 부호이득이 커짐을 확인할 수 있었다.

둘째, LDPC 부호화된 OFDM/DS는 페이딩과 재머 환경하에서도 충분한 평균화 효과를 복호기에 전달해 줄 수 있을 때 우수한 부호이득을 보임은 성능곡선을 통해서 확인할 수 있었다. JSR이 낮아질수록 LDPC로 인한 부호이득이 커짐을 확인할 수 있었다.

페이딩을 거친 신호는 재머에 의해서 크게 방해를 받으므로 짧은 PN 시퀀스로 충분한 평균화 효과를 얻을 수 없었다. 이것은 그 후에 처리되는 복호화 과정에도 영향을 미쳐서 충분한 부호이득을 얻을 수 없

게 하였다. 따라서 충분한 평균화 효과와 LDPC의 부호화 이득을 얻기 위해서는 PN시퀀스를 15에서 127로 길게 하여 충분한 LDPC에 의한 부호화 이득을 얻을 수 있었다.

이는 충분한 평균화 효과를 달성시에 LDPC 부호화된 OFDM/DS가 펄스잡음 재머와 부분대역 잡음재머에서 강한 특성을 보이고 있음을 나타낸다. 그러나 이러한 PN시퀀스 길이의 증가는 성능개선의 이득을 얻는 대신 전송속도의 감소로 이어지므로 OFDM이 갖는 장점인 대역폭 효율과 고속 데이터 전송 효과는 감소할 수 있다.

셋째, LDPC 복호기의 반복횟수의 증가로 인해서 시스템의 연산량은 많아지나, 낮은 부호이득을 갖는 오류정정 부호보다도 짧은 PN 시퀀스에서 더 높은 부호이득을 얻을 수 있었다. 이를 통해서 부호이득이 높은 오류정정부호는 부호이득이 낮은 부호이득을 갖는 오류정정 부호 보다도 짧은 PN길이를 가지고도 원하는 비트오류율을 얻을 수 있다. 이 결과는 LDPC 부호화된 OFDM/DS가 낮은 부호이득을 갖는 오류정정 부호를 사용하는 경우보다도 더 짧은 PN시퀀스를 사용하기 때문에 더 적은 대역폭을 사용하여 전송이 가능하다. 재머에 대해서 부호이득을 충분히 얻을 수 있을 정도의 충분한 평균화 효과를 갖는 경우, 높은 부호이득을 갖는 LDPC의 사용으로 전송속도의 감소 없이 사용할 수 있음을 알 수 있다.

LDPC 부호화된 OFDM/DS 시스템은 높은 JSR의 펄스 잡음 재머와 부분대역 잡음 재머에서도 우수한 성능을 보여주었다. 이는 LDPC 부호화된 OFDM/DS 시스템이 강력한 항 재밍 능력을 갖고 있음을 나타낸다. 또한 현재 시뮬레이션에는 적용하지 않은 파일럿을 이용해서 페이딩에 의한 영향을 감소시킨다면 페이딩채널에서도 더 좋은 성능을 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Block, F. J., Comparison of Jamming of Airborne Networking Waveforms, IEEE MILCOM 2005, pp. 2119~2125, 2005. 10.

[2] Ormondroyd, R. F., Al-Susa, E., Impact of Multipath Fading and Partial-band Interference on the Performance of a COFDM/CDMA Modulation Scheme for Robust Wireless Communications, IEEE MILCOM 98, pp. 67~678, 1998. 10.

[3] 이두호외 2인, Anti-Jamming 기반 전술통신 기술, 한국통신학회지(정보와 통신) 제24권 제10호, pp. 2~33, 2007. 10.

[4] 차재상외 3인, 최신 이동통신 시스템, 그린출판사, 2005.

[5] 하정석, Error Control Codes for Future Wireless Communications, 4세대 이동통신 포럼 “휴대 인터넷 시스템 구현기술과 서비스” 워크샵, 2004. 12.

[6] Todd K. Moon, Error Correction Coding (Mathematical Methods And Algorithms), John Wiley & Sons Inc, 2005.

[7] 박종현외 3인, OFDM/SFH와 OFDM/DS 시스템의 Jamming 채널에서 성능 비교, 한국 전자 과학회논문지 제14권 제11호, pp. 1149~1155, 2003. 11.

[8] Jun Tan, Stuber, G. L., Anti-jamming Performance of Multi-carrier Spread Spectrum with Constant Envelope, Communications, ICC '03. IEEE International Conference on, pp. 743~747, 2003.

[9] Richard van Nee, Ramjee Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, 2000.

[10] Futaki, H., Ohtsuki, T, Low-Density Parity-Check(LDPC) Coded OFDM Systems, Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th, pp. 82~86, 2001.

[11] Chi, D. W., Pankaj Das, Effect of Jammer on the Performance of OFDM In the Presence of Nonlinearity In Rayleigh Fading Channel with Application to 802.11n WLAN, IEEE MILCOM 2006, pp. 1~7, 2006. 10.