

WMAN 시스템의 이중 이진 구조 터보부호 인터리버 최적화 설계 및 성능 분석

박성준[†]

Optimum Interleaver Design and Performance Analysis of Double-Binary Turbo Code for Wireless Metropolitan Area Networks

Sung-Joon Park



Double-binary turbo code has been adopted as an error control code of various future communication systems including wireless metropolitan area networks (WMAN) due to its powerful error correction capability. One of the components affecting the performance of turbo code is internal interleaver. In 802.16 d/e system, an almost regular permutation (ARP) interleaver has been included as a part of specification, however it seems that the interleaver is not optimized in terms of decoding performance. In this paper, we propose three optimization methods for the interleaver based on spatial distance, spread and minimum distance between original and interleaved sequence. We find optimized interleaving parameters for each optimization method and evaluate the performances of the proposed methods by computer simulation under additive white Gaussian noise (AWGN) channel. Optimized parameters can provide up to 1.0 dB power gain over the conventional method and furthermore the obtainable gain does not require any additional hardware complexity.

Key words : Double-binary turbo code, Wireless metropolitan area network, 802.16 d/e, Interleaver design



이중 이진 구조의 터보부호는 우수한 성능을 기반으로 무선 도심영역네트워크(wireless metropolitan area networks, WMAN)를 포함한 각종 차세대 통신 시스템의 표준으로 채택되고 있다. 이러한 이중 이진 구조 터보부호를 구성하는 요소 중의 하나가 인터리버인데 802.16 d/e 시스템의 경우 유사정형순환(almost regular permutation, ARP) 인터리버를 사용하고 있으나 그 파라미터들이 최적화 되어 있지 않다. 이에 본 논문에서는 인터리빙 파라미터 최적화를 위해 인터리빙 전, 후의 공간적 거리, 스프레드, 부호어 간의 최소 거리를 고려한 세 가지 최적화 방안을 제시하고 각각의 경우에 있어서 최적의 파라미터들을 찾는다. 성능 평가를 위해 가산성 백색가우시안 잡음 환경에서 시뮬레이션을 수행하였으며 기존 파라미터에 의한 성능과 제안 방법들에 의해 최적화된 파라미터들을 적용한 성능들을 비교, 분석하였다. 제안 파라미터를 적용할 경우 불록 크기에 따라 최대 1.0 dB의 전력 이득을 얻을 수 있음을 검증하였으며, 이러한 이득은 단순한 파라미터 변경만으로 이루어지므로 기존 시스템의 복잡도를 전혀 증가시키지 않는다.

주요어 : 이중 이진 구조 터보부호, 무선 도심영역네트워크, 802.16 d/e, 인터리버 설계

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 2008년도 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음 (IITA-2008-C1090-0801-0044)

2008년 2월 1일 접수, 2008년 3월 1일 채택

[†] 강릉대학교 정보전자공학부 전자공학전공

주 저 자 : 박성준

교신저자 : 박성준

E-mail; psj@iecc.org

1. 서 론

무선 채널을 활용하는 상용 무선통신 시스템들은 정보의 전송 도중 가산성 백색가우시안 잡음(additive white Gaussian noise)과 다중경로 페이딩 등에 의해 정보의 손실을 입게 되는데 이를 극복하기 위한 다양한 물리계층 기술 중의 하나가 오류정정 부호 기술^[1]이다. 특히, 1993

년 Berrou 등에 의해 최초로 제안된 터보부호^[2]는 매우 우수한 오류정정 능력을 가지고 있어서 효율적인 복호 방식 및 성능 분석에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다^[3-5]. 터보부호는 현재 운용중인 3세대 이동통신 WCDMA^[6]와 cdma2000^[7] 시스템 모두에서 오류정정 부호 표준으로 채택되어 있으며 주로 고품질, 고효율 데이터 전송을 필요로 하는 트래픽 채널에 적용되고 있다.

선형 궤환 쉬프트 레지스터의 입력으로 단위시간 당 단일 비트를 공급하는 기존의 터보부호와는 달리 두 개의 비트를 공급하는 형태로 설계한 부호가 이중 이진 구조 터보부호(double-binary turbo code)^[8]인데, 이 경우 부호어 간의 최소 거리(minimum distance)가 증가하여 복호 성능이 향상되고 단위 시간당 처리량(throughput)이 높아져 복호 처리 시간이 감소한다는 장점을 갖게 된다. 상기 나열한 장점들에 기인하여 이중 이진 구조 터보부호는 위성통신(DVB-RCS)^[9] 및 IEEE 802.16 d/e (WiMax /WiBro)^[10] 시스템의 표준으로 채택된 바 있다.

한편, 이중 이진 구조 터보 부호기에 있어서 성능을 결정짓는 요소 중의 하나는 인터리버(interleaver)이며, 현재 802.16 d/e 규격에 포함되어 있는 인터리버는 Berrou 등의 연구^[11] 결과를 기반으로 설계되어 있다. 즉, 블록 단위의 부호기 입력이 주어지면 순환형 유사정형순환(almost regular permutation)을 수행하여 입력 패턴과는 다른 뒤섞인 비트열들을 생성하는데, 이러한 일련의 동작은 블록 크기에 의존하는 네 개의 파라미터를 기반으로 하여 발생한다. 현재의 규격에 제시된 상기 파라미터들은 일정한 일관성이 없이 설계되어 있으며, 이에 이 논문에서는 802.16 d/e 시스템의 이중 이진 구조 터보부호를 위한 인터리빙 파라미터 최적화 방안을 고찰한다. 인터리버의 성능 척도가 되는 인터리빙 전, 후의 공간적 거리(spatial distance), 스프레드(spread), 부호어 간의 최소 거리를 각각 고려한 세 가지 인터리빙 파라미터 최적화 방안을 제시하고 각각의 경우에 있어서 최적의 파라미터들을 도출한다. 가산성 백색가우시안 잡음 환경 하에서 제안한 최적화 방법들에 의해 도출한 파라미터를 적용한 결과와 기존 파라미터를 적용한 결과를 시뮬레이션하고 그 결과들을 비교 분석한다.

이 논문의 구성을 간략히 설명하면 다음과 같다. 2장에서 이중 이진 터보 부호기의 구조와 원리에 대해 설명하고, 3장에서 시스템 성능 향상을 위한 세 가지 인터리버 파라미터 최적화 방안을 제안한다. 4장에서 시뮬레이션 환경 및 방법론을 상세하고 시뮬레이션 결과를 수록하고 획득한 결과를 비교 분석하며, 5장에서 본 논문의 결론을

제시한다.

2. 이중 이진 구조 터보부호

2.1 부호기 구성

그림 1에 802.16 d/e 규격에 제시된 이중 이진 터보 부호기의 구조를 보였다. 부호기의 입력은 N_{ep} 개의 이진 비트로 구성된 블록 단위로 공급되고 부호기의 최초 입력단에서 N_{ep} 개 이진 비트는 각각 N 비트로 구성된 A, B 서브블록(subblock)으로 분류된다. 부호기에서는 입력 A, B 서브블록들을 활용하여 출력 A, B, Y_1 , W_1 , Y_2 , W_2 서브블록들을 생성하는데 각 출력 서브블록들도 N 비트로 구성되어 있어 해당 부호의 모 부호율은 1/3이 된다. 여기서, 출력 A, B 서브블록은 정보비트를 그대로 출력하는 구조적 부호화(systematic encoding) 과정을 수행한 결과이고, 출력 Y_1 , W_1 은 입력 A, B 서브블록의 비트열들을 이중 이진 구조의 궤환형 길쌈 부호기에 통과시켜 획득한 패리티 비트열에 해당하며, Y_2 , W_2 는 입력 A, B 서브블록의 비트열들을 인터리버(Int.)에 통과시켜 비트열의 순서를 뒤섞은 후 이중 이진 구조의 궤환형 길쌈 부호기에 통과시켜 획득한 패리티 비트열에 해당한다. 상술한 Y_1 , W_1 의 생성 또는 Y_2 , W_2 의 생성은 그림 1에 나타난 두 개의 스위치에 의해 가능하며, 길쌈 부호기에 포함된 S_1 , S_2 , S_3 는 각각 D 플립플롭(flip-flop)으로 구성되는 쉬프트 레지스터의 구성 요소에 해당한다.

2.2 인터리버

모든 터보부호는 구조적으로 내부 인터리버를 포함하고 있으며 그림 1에 나타난 인터리버에서는 각각 N 비트로 구성된 A, B 서브블록을 입력으로 제공받아 비트열 순서를 뒤섞는 기능을 수행한다. 다음은 인터리버에서 수행하는 상세 동작이다.

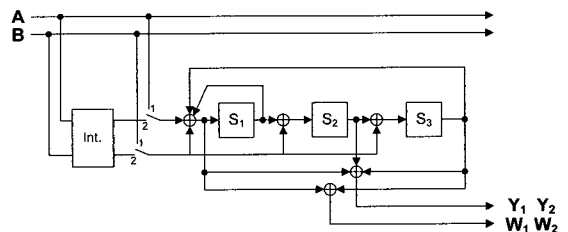


그림 1. 802.16 d/e 이중 이진 터보 부호기

[과정 1] 비트 쌍 교환

$$\text{For } j = 0, 1, \dots, N-1, \\ \text{if } (j \bmod 2 = 0), (B_j, A_j) = (A_j, B_j) \quad (1)$$

[과정 2] 인터리빙 주소 i 생성

$$\text{For } j = 0, 1, \dots, N-1, \\ \text{switch } j \bmod 4 ; \quad (2) \\ \text{case 0: } i = (P0 * j + 1) \bmod N \\ \text{case 1: } i = \left(P0 * j + 1 + \frac{N}{2} + P1 \right) \bmod N \\ \text{case 2: } i = (P0 * j + 1 + P2) \bmod N \\ \text{case 3: } i = \left(P0 * j + 1 + \frac{N}{2} + P3 \right) \bmod N$$

여기서 $P0, P1, P2, P3$ 는 서브블록 크기 N 에 의존하는 인터리빙 상수들이며 주요 N 값에 대한 상수들을 표 1에 수록하였다.

상기 [과정 1]에서 매 짝수 비트에 대해 A와 B의 비트를 서로 치환하고, [과정 2]에서 인터리빙 전의 주소 j 에 대해 인터리빙 후의 주소 i 를 생성한다. 조금 더 자세히 관찰해보면, 주소 i 를 생성함에 있어서 j 모듈로 4 연산을 기반으로 함과 동시에 상수 $P1, P2, P3$ 를 사용하여 유사정형순환 특성을 갖도록 함을 알 수 있다. 한편, 유효한 인터리빙 주소를 지속적으로 생성하기 위해서 상수 $P0$ 는 N 과 상호 소수(relatively prime) 관계에 있어야 한다. 표 1의 현재 규격을 살펴보면 상수 $P0$ 는 서브블록 크기 N 과 상호 소수 관계에 있을 뿐 N 에 따른 특별한 규칙은 없으며, 상수 $(P1, P2, P3)$ 는 $(N/2, N/4, 3N/4)$ 규칙을 만족하는 경우가 상당수 있고 일부는 특별한 규칙 없이 설계되어 있음을 알 수 있다.

표 1. 802.16 d/e 규격 인터리빙 파라미터

N	P0	P1	P2	P3
24	5	0	0	0
48	13	24	0	24
72	11	6	0	6
96	7	48	24	72
128	13	64	32	96
144	17	74	72	2
160	29	80	40	120
192	11	96	48	144
240	13	120	60	180

3. 인터리빙 파라미터 최적화

3.1 최적화 방법 1: S_1 최대화

효율적인 인터리빙을 위해서는 인터리빙 전, 후의 비트열 간에 상이한 정도가 커야하며 이를 판단하는 기준 중의 하나가 아래 식으로 규정되는 공간적 거리^[8,9]이다.

$$S(j_1, j_2) = f(j_1, j_2) + f(i_1, i_2) \quad (3)$$

여기서, $f(u, v)$ 는 다음과 같이 정의되는 순환형 거리(circular distance)를 의미한다.

$$f(u, v) = \min\{|u - v|, N - |u - v|\} \quad (4)$$

즉, 임의의 인터리버가 주어져 있는 경우, 가능한 모든 j_1, j_2 에 대해 식 3을 계산하여 획득하는 공간적 거리들의 최소값을 식 5의 S_1 으로 규정할 수 있으며, 이 값이 클수록 인터리빙 전, 후의 비트열이 서로 상이하게 되고 터보부호의 성능 향상을 기대할 수 있다.

$$S_1 = \min_{j_1, j_2} \{S(j_1, j_2)\} \quad (5)$$

이에, 제안하는 최적화 방법 1에서는 상수 $(P1, P2, P3)$ 를 $(N/2, N/4, 3N/4)$ 으로 고정하고 상기 S_1 을 최대화하는 상수 $P0$ 를 찾았다. 물론, 탐색의 대상이 되는 $P0$ 후보군은 유효한 인터리빙 주소 생성을 위해 N 과 서로 소수 관계로 국한하였다.

3.2 최적화 방법 2: S_2 최대화

인터리버 설계에 활용되는 또 다른 평가 지표 중의 하나가 다음에 정의하는 스프레드, S_2 이다^[12].

$$|i_1 - i_2| \geq s \text{ for } |j_1 - j_2| \leq s \quad (6)$$

$$S_2 = \max(s) \quad (7)$$

즉, 임의의 인터리빙 전 어드레스 j_1 과 거리가 s 이내 에 있는 모든 어드레스 j_2 에 대해 이들의 인터리빙 후 어드레스 i_1 과 i_2 의 차이가 s 이상이어야 하는 조건을 만족시키는 최대의 s 값을 스프레드 S_2 로 정의한다. 이것은 인터리빙 전에 s 이내로 근접해 있는 주변 어드레스들을 인터리빙을 통해 s 이상으로 분산시킨다는 의미를 가지며, 이러한 s 를 최대화함에 의해 인터리빙 전, 후의 비트열들이 서로 상이해지게 하는 효과를 획득하는 것이다.

제안하는 최적화 방법 2에서는 상수 $(P1, P2, P3)$ 를 $(N/2, N/4, 3N/4)$ 으로 고정하고 상기 S_2 를 최대화하는

상수 P_0 를 찾았다. 여기서 탐색의 대상이 되는 P_0 는 N 과 서로 소수 관계에 있다.

3.3 최적화 방법 3: d_{\min} 최대화

부호어 간의 최소 거리(minimum distance, d_{\min})가 오류 정정 부호의 성능을 좌우하는 중요한 지표라는 사실은 일반적으로 잘 알려져 있다^[1]. 터보부호의 경우에도 최소 거리를 구하기 위한 여러 방법^[13,14]들이 제시되었으나, 상기 방법들의 경우 블록 크기가 큰 경우 필요로 하는 연산량이 매우 높아져서 최소 거리를 구하는 것이 불가능하였다. 최근에는 이러한 문제점을 해소하기 위해 반복적인 방법을 사용하여 터보부호의 최소 거리를 구하는 기법^[15-17]들이 제안된 바 있다.

제안하는 최적화 방법 3에서는 상수 (P_1, P_2, P_3)를 ($N/2, N/4, 3N/4$)으로 고정한 후, 최소 거리를 최대화하는 상수 P_0 를 찾았다. N 과 서로 소수 관계에 있는 P_0 를 고려하였으며, 최소 거리를 구하는 기법으로는 정확도와 복잡도를 고려하여 단일 임펄스 기법^[17]을 적용하였다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 방법론

제안하는 최적화 방법들의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 가산성 백색가우시안 잡음 채널을 가정하였고 부호기로는 그림 1에 보인 802.16 d/e 규격의 이중이진 구조 터보부호기를 사용하였다. 부호율은 1/3을 적용하였으며 변조 방식으로는 QPSK(quadrature phase amplitude modulation)를 적용하였다. 복호 방식으로는 비교적 우수한 성능을 내면서도 복잡도가 낮아 널리 사용되고 있는 Max-Log-MAP 방식을 적용하였으며 복호의 반복 횟수는 8회로 고정하였다. 또한, Max-Log-MAP 복호기의 성능 향상을 위해 외래정보(extrinsic information)에 부과되는 가중치(weighting factor) 값으로 0.75를 사용하였다. 서브블록 N 의 크기로는 표 1에 나타낸 24, 48, 72, 96, 128, 144, 160, 192, 240을 고려하였으며 성능평가 지표로는 신호 대 잡음비 E_s/N_0 에 따른 프레임오율(frame error rate, FER)을 사용하였다. 또한, 각 서브블록 크기에 대해서 각 신호 대 잡음비 당 프레임 오류가 100개 이상 생성될 때까지 시뮬레이션하여 획득 데이터의 신뢰도를 확보하였다.

4.2 시뮬레이션 결과 분석

그림 2부터 그림 7까지 각각 서브블록 크기가 48, 96, 128, 160, 192, 240인 경우의 모의실험 결과를 수록하였다. 각 그림에서 [C]는 현 규격 인터리빙 파라미터를 적용

한 성능을 의미하고, [O1], [O2], [O3]는 각각 최적화 방법 1, 최적화 방법 2, 최적화 방법 3에 의해 찾은 인터리빙 파라미터를 적용한 성능을 의미한다. 각 범례에 포함된 네 개의 숫자는 순차적으로 P_0, P_1, P_2, P_3 를 의미한다. $N=48, 96, 128$ 의 경우, [O1], [O2], [O3]에 의해 최적화한 인터리빙 파라미터들이 서로 일치하며, 이들은 각각 기존 파라미터 대비 성능 이득을 갖는다. 서브블록의 크기가 큰 경우에는($N=160, 192$) [O3]의 성능이 가장 우수하는데 이는 서브블록 크기가 커질수록 부호어간 최소 거리가 성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 한편, $N=240$ 에서는 [O2]가 [O3]보다 약간 우수한 성능을 보였다.

표 2에 [O1], [O2], [O3] 방식으로 최적화한 최적 인터리빙 파라미터들을 나타내었다. 또한, 그림 2-7에 제시한 시뮬레이션 결과를 기반으로 하여 목표 프레임오율을 10^{-5} 로 고정하였을 때 최적 파라미터들을 사용함에 의해 획득할 수 있는 전력 이득(power gain)을 표 2의 가장 우측 열에 기록하였다. 결과에 따르면 기존 인터리빙 파라미터들을 사용하는 대신 표 2에 제시한 인터리빙 파라미터들을 사용함에 의해 서브블록 크기에 따라 0.25dB에서 최대 1.0dB까지의 전력 이득을 얻을 수 있음을 고찰할 수 있다. 이는 제안 파라미터들을 사용하면 송신기의 전송 전력을 상기 전력 이득 만큼 줄여 송신하여도 기존 파라미터들을 사용한 경우와 동일한 오류 성능을 획득할 수 있음을 의미한다. 또한, 제안 방식은 기존 인터리버의 구조 변경을 필요로 하지 않는다는 특징을 갖는다. 즉, 제안 방법을 적용하기 위해서는 소프트웨어로 처리되는 인터리빙 파라미터 값만 변경하면 되며, 이는 현재 시스템과의 호환성(backward compatibility)을 유지하면서도 성능 향상을 얻을 수 있다는 의미를 갖는다. 한편, 서브블록 크기가 24, 72, 144일 경우는 기존의 파라미터들을 사용하

표 2. 최적화된 인터리빙 파라미터들과 기존 파라미터에 의한 성능 대비 이득

N	P0	P1	P2	P3	Power Gain [dB]
24	5	0	0	0	-
48	23	24	12	36	0.5
72	11	6	0	6	-
96	17	48	24	72	0.25
128	21	64	32	96	0.5
144	17	74	72	2	-
160	77	80	40	120	1.0
192	161	96	48	144	0.6
240	41	120	60	180	0.25

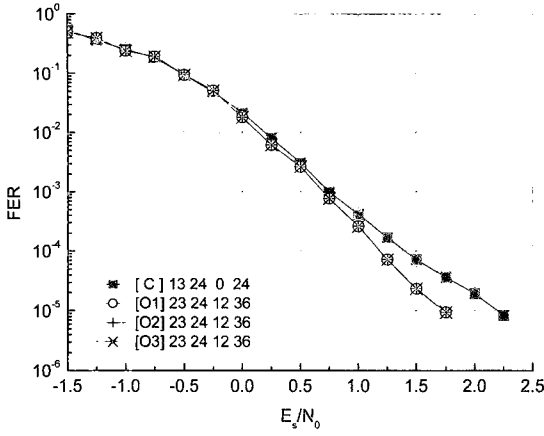


그림 2. FER vs. E_s/N_0 : $N=48$

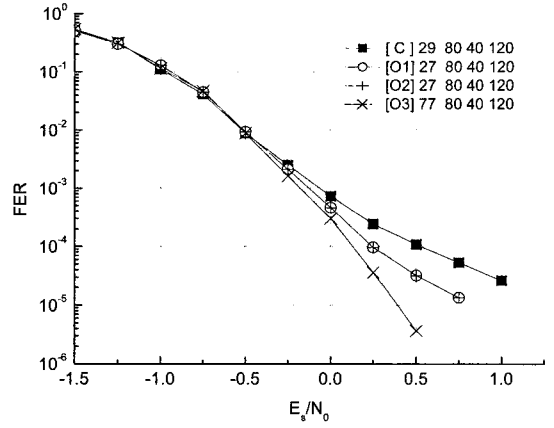


그림 5. FER vs. E_s/N_0 : $N=160$

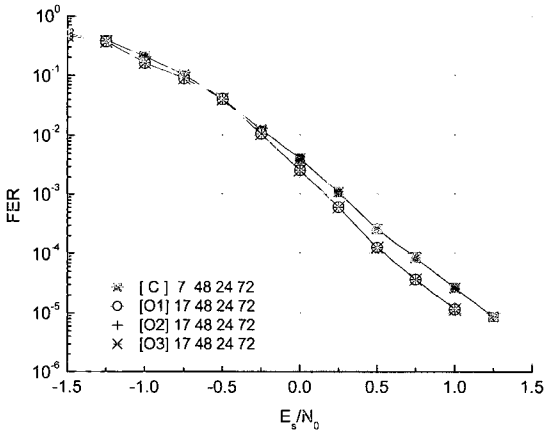


그림 3. FER vs. E_s/N_0 : $N=96$

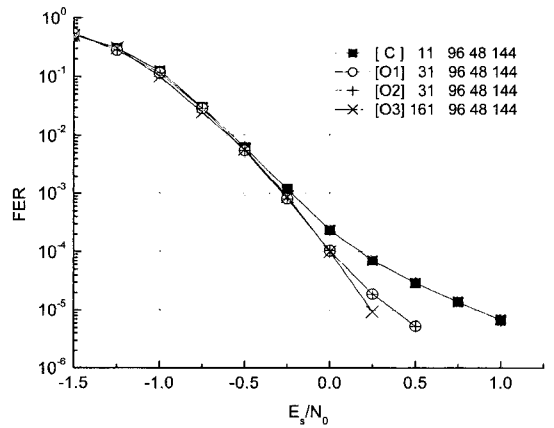


그림 6. FER vs. E_s/N_0 : $N=192$

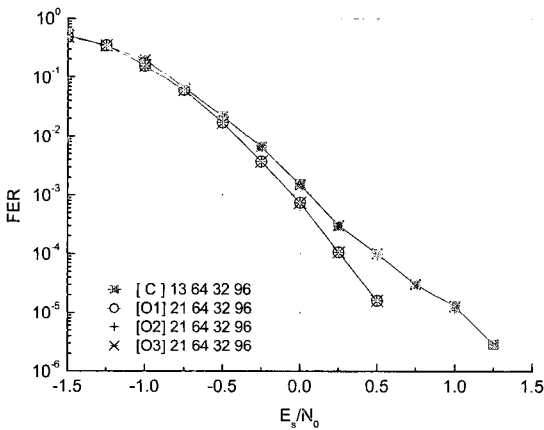


그림 4. FER vs. E_s/N_0 : $N=128$

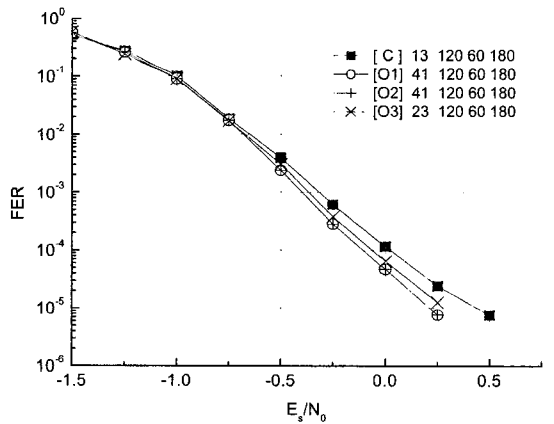


그림 7. FER vs. E_s/N_0 : $N=240$

였을 때 가장 좋은 성능을 보였으며, 제안 방식, 즉, [O1], [O2], [O3] 최적화에 의한 성능 이득은 얻을 수 없었다.

5. 결 론

이 논문에서는 WMAN(IEEE 802.16 d/e) 시스템 및 차세대 통신 시스템의 오류정정 부호로 검토되고 있는 이중 이진 구조 터보부호의 인터리버에 대해 연구하였다. 현재 사용되고 있는 유사정형순환 인터리버에 내재한 네 개의 인터리빙 파라미터들이 최적화되어 있지 않음을 감안하여, 인터리빙 전, 후의 공간적 거리, 스프레드, 부호어 간의 최소 거리를 최대화하는 세 가지 관점에서 인터리빙 파라미터들을 각각 최적화하였다. 다양한 서브블록 크기에서 시뮬레이션을 통해 제안 방법들의 성능을 보였으며, 기존 방법 대비 최대 1.0dB의 전력 이득이 있음을 검증하였다. 특히, 상기 이득은 기존의 인터리빙 파라미터들을 제안한 파라미터들로 대체하는 것만으로 획득이 가능하므로 구현을 위해 추가로 요구되는 복잡도는 전혀 없으며 이로 인한 각 시스템에서의 규격 반영 및 적용이 용이할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. S. B. Wicker (1995), *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*, Prentice Hall.
2. C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima (1993), "Near Shannon limit error-correction coding and decoding: Turbo-codes," in Proc. IEEE ICC, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070.
3. P. Robertson (1994), "Illumination the structure of code and decoder of parallel concatenated recursive systematic (Turbo) codes," in Proc. GLOBECOM, San Francisco, U.S.A., pp. 1298-1303.
4. J. Hagenauer, E. Offer and L. Papke (1996), "Iterative decoding of binary block and convolutional codes," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 42, No. 3, pp. 429-445.
5. C. Berrou and A. Glavieux (1996), "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes," IEEE Trans. Commun., Vol. 44, No. 10, pp. 1261-1271.
6. 3GPP, www.3gpp.org (2007), TS36.212, v.1.3.0.
7. 3GPP2, www.3gpp2.org (2005), C.S0002-D, v.2.0.
8. C. Douillard and C. Berrou (2005), "Turbo code with rate- $m/(m+1)$ constituent convolutional codes," IEEE Trans. Commun., Vol. 53, No. 10, pp. 1630-1638.
9. Digital Video Broadcasting interaction channel for satellite distribution system (2000), ETSI reference EN 301 790, v.1.2.2.
10. IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 (2006).
11. C. Berrou, Y. Saouter, C. Douillard, S. Kerouedan and M. Jezequel (2004), "Designing good permutations for turbo codes: toward a single model," in Proc. IEEE ICC, Paris, France, pp. 341-345.
12. D. Divsalar and F. Pollara (1995), "Multiple turbo codes for deep-space communications," JPL Progress Report 42-121.
13. L. C. Perez, J. Seghers and D. J. Costello Jr. (1996), "A distance spectrum interpretation of turbo codes," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 42, No. 11, pp. 1698-1709.
14. R. Garello, P. Pierleoni and S. Benedetto (2001), "Computing the free distance of turbo codes and serially concatenated codes with interleavers: algorithms and applications," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 19, No. 5, pp. 800-812.
15. C. Berrou, S. Vaton, M. Jezequel and C. Douillard (2002), "Computing the minimum distance of linear codes by the error impulse method," in Proc. IEEE Globecom, Taipei, Taiwan, pp. 1017-1020.
16. R. Garello and A. V. Casado (2004), "The all-zero iterative decoding algorithm for turbo code minimum distance computation," in Proc. IEEE ICC, Paris, France, pp. 361-364.
17. S. Crozier, P. Guinand and A. Hunt (2005), "Estimating the minimum distance of turbo-codes using double and triple impulse methods," IEEE Commun. Lett., Vol. 9, No. 7, pp. 631-633.



박 성 준 (psj@ieee.org)

1996 연세대학교 전파공학과 학사
 1998 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 2004 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사
 1999~2002 InfoPlus 연구원
 2003~2005 삼성전자 정보통신총괄 정보통신연구소 책임연구원
 2005~현재 강릉대학교 정보전자공학부 전자공학전공 조교수

관심분야 : 디지털 통신 시스템 설계