

# CDMA 채널 환경에서의 인터리버 설계 및 MAP 기반 터보 부호에 관한 연구

정희원 박노진\*, 강철호\*

## A Study on Iterative MAP-Based Turbo Code and Interleaver Design over CDMA Channels

No-Jin Park\*, Chul-Ho Kang\* *Regular Members*

### 요 약

디지털 통신 시스템에서 오류 정정 부호화 방식으로 사용되는 Turbo Code의 성능은 부호기에 내재되어 부호의 자유 거리 결정에 큰 영향을 미치는 인터리버와 복호기에서 수행되는 반복 복호에 의한 것이다. 하지만 우수한 성능을 얻기 위해 수신과정에서 많은 지연시간이 요구되는데 이는 주로 인터리버의 크기에 의존하게 된다. 그러나 많은 연구의 결과로 효율적인 인터리버 설계에 대한 연구 결과가 발표되고 있다. 또한 Turbo Code는 페이딩 채널 상에서도 신뢰성 있는 강력한 코딩 기법으로 알려져, 최근 ITU 등에서 IMT-2000과 같은 차세대 이동 통신에서 채널 코드의 표준으로 채택되었다. 따라서 본 논문에서는 기존의 블록 인터리버의 성능을 개선한 인터리버와 MAP 알고리즘을 이용한 병렬 구조의 터보 복호기를 제안하고, 차세대 무선 멀티미디어 통신에서 실시간 음성 및 비디오 서비스를 제공 시 복호 지연시간을 단축시키기 위해 가변 복호 방법을 이용하여 AWGN과 페이딩 채널 환경에서의 컴퓨터 모의 실험을 통해 성능 분석을 하였다.

### ABSTRACT

In the recent digital communication systems, the performance of Turbo Code using the error correction coding depends on the interleaver influencing the free distance determination and the recursive decoding algorithms that is executed in the turbo decoder. However, performance depends on the interleaver depth that need a great many delay over the reception process. Moreover, Turbo Code has been known as the robust coding methods with the confidence over the fading channel. The International Telecommunication Union(ITU) has recently adopted as the standardization of the channel coding over the third generation mobile communications the same as IMT-2000. Therefore, in this paper, we proposed of the interleaver that has the better performance than existing the block interleaver, and Turbo Decoder that has the parallel concatenated four-step structure using MAP algorithm. In the real-time voice and video service over the third generation mobile communications, the performance of the proposed two methods was analyzed by the reduced decoding delay using the variable decoding method by computer simulation over AWGN and fading channels.

### I. 서론

길쌈 부호의 변형인 터보 부호는 1993년 6월 스위스의 Geneva에서 개최된 The International Con-

ference on Communications(ICC)에서 Berrou 등에 의해 발표되어, Shannon의 이론적 한계와 실제적으로 구현 가능한 부호 시스템 사이의 간격이 좁혀지는 부호로서 탄생되었다. 터보 부호는 같은 모양의

\* 광운대학교 전자통신공학과 신호처리 연구실(parkmjnj@korea.com)  
논문번호 : 00406-1023, 접수일자 : 2000년 10월 23일

길쌈 부호 2개 이상을 병렬로 연결하고, 전송 전에 부호 비트의 배열을 바꾸어 주기 위해 각각의 부호 화기의 입력으로 들어가는 시퀀스를 인터리버를 통과하게 함으로서 부호화기에서 나오는 출력 시퀀스를 서로 다른 배열로 전송한다. 터보부호의 성능에 영향을 미치는 주요 요소로는 인터리버, 메모리, 펀처링(puncturing)의 유무, 노이즈 레벨과 반복 복호화 횟수 등이 있다<sup>[1][2]</sup>. 일반적으로 인터리버의 타입과 길이는 주어진 터보 코드의 성능을 결정하는 주요한 요소로서 1000bit 이상을 이용할 경우 뛰어난 성능을 달성할 수 있다. 하지만 이러한 long-size 인터리버는 너무 긴 지연시간을 초래하게 되고, 음성과 비디오 전송과 같은 실시간 통신에는 사용하기 어렵기 때문에 작은 프레임 단위의 인터리버를 위한 시도로서 GSM과 IS-95의 9.6 kbps 및 13kbps에서 사용 가능한 192bit와 256bit의 인터리버가 제안되었다. 또한 long-size 인터리버와 비교하여 small-size 인터리버는 큰 이득을 얻을 수 없으므로 small-size 인터리버에 대한 연구가 수행되었다<sup>[3][4][5]</sup>. 터보 부호는 낮은 Eb/No에서 강력한 오류정정 능력을 갖는 코드 기법임에도 불구하고 너무 긴 복호 지연시간으로 인해 성능에 영향을 초래하므로 이를 해결하기 위한 노력의 일환으로 복호가 완료되면 반복 횟수를 중단시킴으로서 긴 복호 지연의 단점을 극복하기 위한 연구가 수행되었다<sup>[6]</sup>. 본 논문에서는 짧은 프레임 단위의 블럭 인터리버의 성능을 개선한 S-R 인터리버와 반복 복호 횟수를 감소시키고 성능을 향상시킨 MAP 기반 병렬 구조의 4-New 터보 부호기를 제안하고, 이를 CDMA 채널 환경의 컴퓨터 모의 실험을 통해 기존 방법과의 비교 및 성능 분석을 하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 터보 부호에 대해 알아보고, III장에서는 본 논문에서 제안한 인터리버에 대해 기술한다. IV장에서는 본 논문에서 사용한 반복 복호 알고리즘에 대해, V장에서는 제안한 터보 부호화기의 대해 유도한다. VI장에서 모의 실험을 통해 제안한 2가지 기법의 성능을 평가하고, VII장에서 결론을 맺는다.

## II 터보 부호기(Turbo Encoder)

그림 1에 나타난 것처럼 본 논문에서 사용한 터보 부호기는 두 개의 RSC(Recursive Systematic Convolutional) 부호와 이 두 RSC 부호를 연결시켜 주는 인터리버로 구성된다. 여기서 RSC 부호란 길

쌈 부호의 일종으로 피드백이 존재하는 systematic 부호이다.

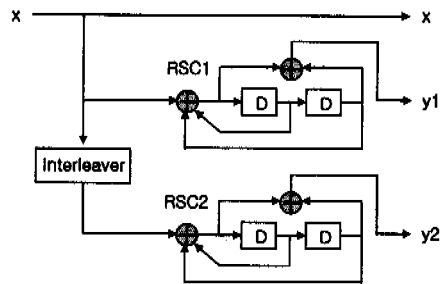


그림 1. 터보 부호기의 구조

구속장의 길이(constraint length)  $K=3$ (i.e., 메모리  $m=2$ ), 부호화율이  $1/3$ , the parity polynomial  $g_1(D)=1+D^2$ , the feedback polynomial  $g_0(D)=1+D+D^2$  인 부호어를 생성시키는 부호기이다. 프레임 길이  $L$ 을 갖는 각 입력 데이터  $x = \{x_0, x_1, \dots, x_{L-1}\}$ 에 대하여 RSC1은 메시지 비트의 원래 입력 순서에 따라 부호화 과정을 수행하여 첫 번째 parity sequence  $y_1 = \{y_{1,0}, y_{1,1}, \dots, y_{1,L-1}\}$ 을 출력하고,  $x$ 의 인터리버된 출력을 받는 RSC2는 인터리버에 의해 순서가 재배열된 메시지 비트의 순서에 따라 부호화 과정을 수행하여, 두 번째 parity sequence  $y_2 = \{y_{2,0}, y_{2,1}, \dots, y_{2,L-1}\}$ 를 출력하므로 그림 1로부터 생성되는 부호어의 부호화율은  $1/3$ 이 된다. 따라서 본 논문의 모의 실험에 사용된 부호기는 그림 1과 같고, 이를 위해 2개의 터보 부호에 사용된 구성부호로는 생성 다항식이  $(7,5)_8$ 인 4 상태 코드를 사용하였는데, 이 코드는 메모리가 2개일 때 가장 효과적인 거리를 제공하는 것으로 알려져 있다.<sup>[7]</sup>

## III. 터보 부호의 인터리버

### 1. 터보 부호의 인터리버 특성

터보 인터리버는 기존의 연쇄부호의 인터리버와 마찬가지로 연접 오류를 랜덤 오류로 변환시키는 중요한 역할을 한다. 즉 첫 번째 복호기에서 연접 오류에 의해 빠르게 복호되지 않은 출력이 두 번째 복호기의 입력에 그대로 들어가게 되면 역시 올바른 복호를 하지 못할 것이고, 이는 다음 단계의 반복 복호 과정에서도 정정이 되지 않기 때문에 상관

관계가 있는 정보를 상관 관계가 없는 정보로 전환하기 위해서는 한 프레임 내에서 연결 오류를 잘 분산시킬 수 있고, 입력열의 특정한 패턴을 제거할 수 있는 인터리버를 사용하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이러한 특성에 기인한 인터리빙 기법들은 터보 코드의 충분한 성능을 얻고 효율적인 구현을 위해 여러 형태의 터보 인터리버들이 연구되어져 왔으나, 가장 일반적으로 사용되는 인터리빙 기법으로는 구성이 용이한 블록 인터리빙과, 터보 부호의 성능이 가장 우수하여 인터리버를 연구하는 데 있어 일반적으로 사용되는 랜덤 인터리빙등이 있다. 하지만 블록 인터리버는 구현이 간단하나 프레임 사이즈가 증가할수록 성능이 감소되고 랜덤 인터리버는 실시간 형태의 구현이 불가능하기 때문에 단지 랜덤 수열 발생기에 의해 발생하는 수열의 저장을 통해 랜덤 인터리버를 구성한다. 인터리버를 설계할 경우 부호어간의 유클리드(Euclidean) 거리분포를 개선시키는 일이 중요한데, 터보 부호의 최소 유클리드 거리(minimum Euclidean distance)가 최대가 되도록 인터리버를 선택하여 사용하는 것이 바람직하게 된다. 좋은 인터리버를 찾는 방법 중의 하나는 가능한 모든 인터리버에 대하여 최소 유클리드 거리를 계산하고, 그 거리가 가장 크도록 하는 인터리버를 선택하는 것이다. 그러나 인터리버의 크기가 커지면 최적의 인터리버를 찾는 것이 어려워진다. 터보코드가 우수한 성능을 내기 위해서는 그림 1의 인터리버가 비 균일(non-uniform) 인터리버여야 하는데, 이는 RSC 부호의 특성상 최대 유클리드 거리 특성이 우수한 부호어를 생성하기 때문이다.<sup>[8][9][10]</sup>

2. 제안한 S-R 인터리버

본 논문에서는 위의 인터리버 설계 특성에 기인하여 기존의 블록 인터리버를 변형하여 최소 유클리드 거리를 최대화 한 S-R(skip-rotate) 인터리버를 제안한다(그림 3). RSC의 재귀 구조(Recursive Structure)에 의한 IIR(Infinite Impulse Response) 특성 때문에 터보 부호기에 들어오는 입력 시퀀스는 두 가지 타입으로 분류할 수 있는데, L개의 정보 시퀀스를 부호화 한 후 어떤 trellis termination technique 없이 메모리를 모두 제로 상태로 만드는 self-terminating method와 L개의 정보 시퀀스의 끝에서 강제로 메모리를 모두 제로 상태로 만들기 위해 tail bits를 추가하는 non-self terminating method가 있다<sup>[8]</sup>. 본 논문에서는 입력 시퀀스의 타

입을 non-self terminating method를 가정하였다. 어떤 임의의 시간에 데이터중 한 프레임을 복호할 때 프레임의 끝 가까이 있는 비트들은 정확한 신뢰 값을 추정하지 못하게 되는 상태를 tail effect라 한다. 이 tail effect는 인터리버가 터보 코드에 사용될 때 성능을 제한하게 되는 중요한 요인이 되므로, 이 tail effect를 제거하고, 최소 유클리드 거리(minimum Euclidean distance)를 최대화하면 터보 복호기의 성능 향상을 기할 수 있다. 일반적인 블록 인터리버의 정방향행렬 형태를 고려하면 그림 2와 같다.

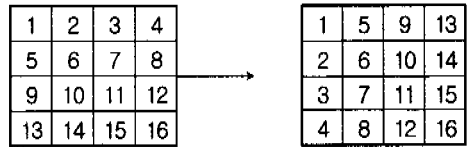


그림 2. 일반적인 블록 인터리버의 구조

이러한 블록 인터리버는 행과 열이 M×M 형태를 가지는데, 데이터를 행 방향으로 쓰고 열 방향으로 읽는 형태이다. 또한 부호어간의 최소 유클리드 거리 h=4 이고, 입력 프레임에 대한 tail bits는 인터리버 된 후 출력 프레임의 끝 주변에 여전히 남아 있게 된다. 이를 응용하여 본 논문에서 제안하는 S-R 인터리버는 입력되는 시퀀스에 따라 행 방향으로 일정한 d=3 만큼 skip 한 후 쓰고, 열 방향으로 bottom에서 top으로 읽는 형태로 구현한다.

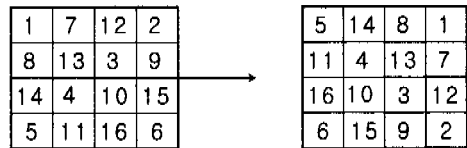


그림 3. 안한 인터리버의 구조

이렇게 함으로서 M=4인 M×M 인터리버를 사용할 경우 부호어간의 유클리드 거리(Euclidean distance) 분포가 h=6이 되어 기존의 블록 인터리버보다 최소 유클리드 거리를 증가시키고, tail bits가 프레임 내부에 위치하게 됨으로서 복호시 tail bits에 의한 영향을 최소화하여 성능을 향상시키는 요인이 된다.

IV. 반복 복호 알고리즘(MAP)

본 논문에서 사용된 MAP(Maximum A Posteriori)

Algorithm은 길쌈 부호의 복호화 방법이었던 Viterbi Algorithm의 대안으로 제시되었다. 이는 선형 부호의 심볼 오류 확률을 최소화 할 수 있는 최적의 복호화 방법으로, 1974년 Bahl-CoCke-Jelinek-Raviv에 의해 발표된 심벌 단위의 BCJR Algorithm이 변형된 것이다. 터보 부호의 복호화는 trellis를 기초로 하는 복호 알고리즘을 이용해서 각각 2개의 Markov process들에 대해서 독립적인 추정을 한다. 따라서 두 복호기 사이에서 소프트 정보를 반복적으로 공유하면 추가적이 이득을 얻을 수 있다 [4][11][12][13]. 그림 4는 일반적으로 사용되는 터보 복호화기의 구조이다.

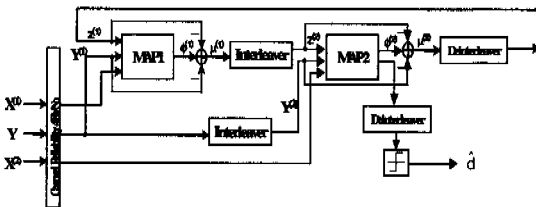


그림 4. 일반적인 터보 복호기

여기서 비트 오류(BER: bit error rate)을 최소화 하는 알고리즘을 MAP 알고리즘이라 하고, 그림 4에서 보듯 터보 부호의 복호기는 반복 복호를 하는 구조로 되어 있다. 먼저 첫 번째 복호기는 systematic 채널 정보  $Y^{(1)}$ 와 첫 번째 부호화기의 잉여 비트  $X^{(1)}$ , 그리고 두 번째 부호화기로부터 받은 priori 정보  $z^{(1)}$ 를 입력으로 사용한다. 위의 정보들을 이용해서 첫 번째 복호화기는 LLR  $\phi^{(1)}$ 을 출력한다. 그리고 첫 번째 부호화기의 외부 정보  $\mu^{(1)}$ 은 출력값  $\phi^{(1)}$ 에서 systematic 입력과 priori 정보를 빼줌으로써 얻을 수 있고 이렇게 구해진 외부 정보  $\mu^{(1)}$ 는 인터리빙 되어서 두 번째 부호화기의 priori 정보( $z_i^{(2)} = \mu_{DNIT(i)}^{(1)}$ )로 사용된다. 그리고 두 번째 부호화기는 인터리빙 된 systematic 정보  $Y^{(2)}$ 와 두 번째 부호화기의 잉여 비트인  $X^{(2)}$ 를 입력으로 받고 다시 부호하여 LLR  $\phi^{(2)}$ 를 출력하고 외부 정보  $\mu^{(2)}$ 를 디인터리빙(deinterleaving)하여 첫 번째 부호화기의 priori 정보( $z_i^{(1)} = \mu_{DENIT(i)}^{(2)}$ )로 보낸다. 이러한 방법으로 일정한 횟수의 반복 복호화 과정이 끝나면 최종 정보를 추정하게 되는데 두 번째 부호화기에서의 LLR 출력을 디인터리빙 한 후에 강 판정을 하여 전송한 메시지 비트  $\hat{d}$ 를 추정한다.

본 논문에서 사용한 MAP 알고리즘은 수신 시퀀스를 이용해서 정보의 상태 천이 사후확률(APP: a posteriori probability)과 전송된 메시지 비트 또는 Markov process에 의해 산출되는 코드 심벌 등을 추정한다. 하지만 MAP 알고리즘은 직접적으로 사후 확률을 계산하기가 효과적이지만 많은 계산 과정과 메모리 및 복호 지연을 필요로 하기 때문에 현재 이를 간소화하기 위한 여러 연구들이 수행되어 왔다. 또한 메시지 비트의 사후확률을 정확하게 추정한다 하더라도 한 비트의 추정에 약  $6 \times 2^m$ 의 곱셈과 덧셈을 필요로 하는 많은 계산 량과 round-off 에러에 이주 민감하다. 이러한 문제들은 곱셈이 덧셈으로 바꾸어 계산하는 로그 계산을 하여 어느 정도 해결하고 있는데, log MAP 알고리즘은 correlation factor에 대한 look-up table이 필요하지만, max-log 알고리즘은 look-up table이 불필요하고, 복잡성도 1/2 정도이다.

### V. 제안한 방법의 터보 복호기

터보 부호의 구조 및 복호 방법은 복호 지연과 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 복호화기의 구조는 하드웨어의 복잡도와 성능에 따라 결정되어야 하고, 반복 복호화의 수는 복호 지연과 성능을 잘 고려하여 선택되어야 한다. 그리고 복호화기의 출력은 연성 입·출력(SISO: Soft In/Soft Output) 데이터이므로 반복적인 복호가 가능하며, 반복 복호의 횟수가 증가할수록 성능이 향상되나 복호 지연과 계산의 복잡성, 연산량 증가 등의 문제를 가져오므로 대략 6~10회 정도의 반복 복호를 수행하면 만족할 만큼의 성능을 얻을 수 있다. 하지만 이러한 반복 복호를 수행함으로써 실시간 통신에서 커다란 장애라 할 수 있는 큰 지연을 수반하게 된다. 특히 직렬 부호화기를 3단 이상 연결하여 사용 시에는 하드웨어의 복잡성과 더불어 많은 복호 지연을 수반하게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 2단 부호화기와 비교하여 하드웨어의 복잡도는 2배로 증가되나 성능은 향상시키고 복호 지연은 감소시킨 4단 병렬 부호화기를 제안한다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 병렬 구조의 4-New 터보 부호화기이다.

그림 5에서  $L_1^{(m)}$ 과  $L_2^{(m)}$ 는  $m$  번째 부호화가 진행된 후 하단 부호기 1과 상단 부호기 2의 LLR(log-likelihood ratio) 출력 값이다. 그리고  $L_3^{(m)}$ 는  $L_1^{(m)}$ 과  $L_2^{(m)}$ 값을 합한 LLR 값이다.

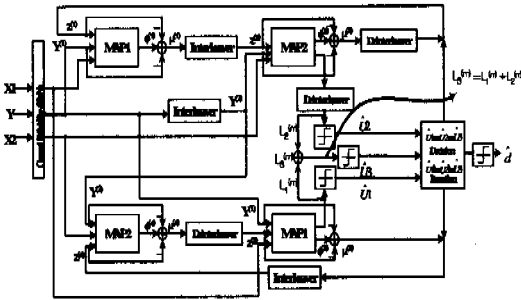


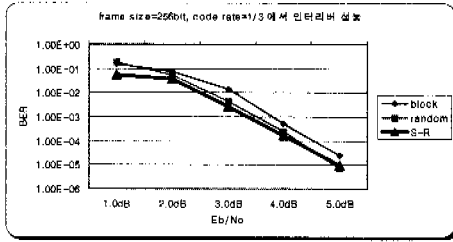
그림 5. 제안한 병렬 구조의 터보 부호기

매 복호시마다 하단 복호기 1과 상단 복호기 2에서 출력되는 LLR 값은 서로 다른 값들의 분포를 가지므로, 각각의 LLR 출력 값을 강 판정(hard decision)한 시퀀스  $\hat{u}_1, \hat{u}_2$ 도 서로 다른 분포 값을 가지며, 각각의 오류를 계산해 보면 두 오류 값이 서로 다르다. 강 판정된  $\hat{u}_1$ 와  $\hat{u}_2$ 의 분포는 서로 다르지만, 복호 횟수  $m$ 이 증가할수록 두 값의 신뢰도가 높아지는 분포로 새롭게 갱신되어 더 이상 성능 향상이 없는 오류 값으로 수렴하게 된다. 기존의 터보 부호기에서는 요구되는 반복 복호횟수  $m$ 번의 복호를 진행한 후  $\hat{u}_2$ 를 추정한다. 이럴 경우 오류가 줄어드는 방향으로 수렴이 빨리 이루어지지 않으면 정해진 복호 횟수만큼 복호를 해야 하겠지만, 그렇지 않고 정해진 복호 횟수 이전에 수렴이 빨리 이루어질 때는 그만큼의 불필요한 복호가 이루어져 바람직한 현상이라 할 수 없다. 특히 비트 에너지 대 잡음의 전력비가 클수록 오류분포 수렴 속도가 빨라져 불필요한 복호로 인한 지연은 더 크다고 할 수 있다. 이 때문에 본 논문에서는 위에서 언급한 각각의 LLR 값이 서로 다르다는 분포 특성을 이용하여 복호 횟수를 상당량 줄일 수 있는 방법을 사용하였다<sup>[6]</sup>. 제안한 병렬 구조의 복호 절차는 매 복호시마다  $\hat{u}_1$  과  $\hat{u}_2$ ,  $\hat{u}_3$  를 서로 비교함으로써 오류 분포가 수렴하게 되며, 강 판정한 3개의 출력 값이 같으면 더 이상 복호를 진행하지 않고  $\hat{u}_3$ 를 판정하고, 그렇지 않으면 정해진 복호 횟수만큼 반복 복호를 진행하게 되므로 기존의 복호 지연 시간을 상당히 단축시킬 수 있다. 또한 일반적인 병렬 구조의 부호기를 이용하는 것 보다 제안한 방식을 이용하여 복호시 상단과 하단의 부호기들이 각각 분리 동작하면서 LLR 값을 출력한다. 따라서 더욱 신뢰성 있는 복호 과정이 진행되고 성능을 향상시킬 수 있음이 컴퓨터 모의 실험을 통해 확인할 수 있었다. 제안한 4-New 복호화기 구조는 기존의 2

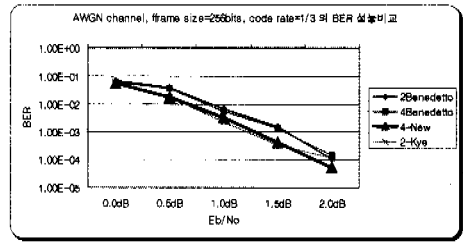
단 직렬 부호기에 비해 하드웨어의 복잡도는 2배이나, 그에 대한 보상으로 성능은 향상시키면서 복호 횟수를 가변적으로 적용할 수 있는 방법을 사용하여 복호 지연을 감소시킬 수 있다. 모의 실험을 통해 프레임 사이즈가 증가할수록 성능이 증가됨을 알 수 있었고, 전체적으로 4096 비트 이하의 프레임에서는 약 0.5~0.8dB 정도의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인 할 수 있었다.

## VI. 실험 결과 및 고찰

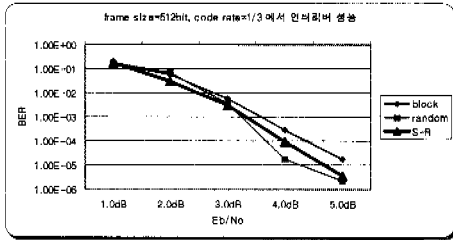
본 논문에서는 CDMA 통신 시스템 채널 환경에서 잡음의 영향으로부터 전송된 신호를 복원하기 위해 필수적인 오류 정정 부호 중 IS-95 및 cdma 2000에서도 채택한 터보 부호에 대해 S-R 인터리버 및 4-New 병렬 구조의 터보 부호화기를 제안하고 이의 이론적 고찰과 모의실험을 통한 분석을 하였다. 복호화 알고리즘은 MAP를 사용하였고, 터보 부호화기는 동일한 2개의 RSC 부호화기를 사용하였다. BPSK 변조를 가정하였으며, 구속장의 길이  $K=3$ , 구성 부호화기의 생성 다항식은  $(7,5)_8$ , 부호율은 펀처링(puncturing)을 사용하지 않은 1/3을 사용하였다. CDMA 채널 환경에서의 성능 분석을 위해 제안한 S-R 인터리버의 채널 모델은 플랫 페이딩 모델을 적용하였고, 제안한 4-New 부호화기를 위한 채널 모델은 AWGN 과 플랫 페이딩 모델을 사용하였다. 반복 복호 횟수는 최대 5회를 적용하여 가변 복호 하도록 하였으며, 정보 시퀀스의 프레임 크기  $L$ 은 256, 512, 1024, 4096 비트인 경우에 대하여 모의 실험하였다. 그림 6은 각각의 프레임에 대해 제안한 S-R 인터리버와 기존 인터리버와의 성능을 비교한 것이다. 각 프레임에 대해 기존의 블록 인터리버에 비해 제안한 S-R 인터리버가  $BER=10^{-5}$ 에서 평균 약 0.4 dB의 이득을 보였으며, 프레임의 크기가 증가할수록 랜덤 인터리버와의 성능 차이를 보임을 알 수 있다. 하지만 구현의 용이성을 고려 할 때 제안한 S-R 인터리버를 쉽게 적용할 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 7과 그림 8은 제안한 방식의 4-New 부호기와 기존의 유사한 터보 부호기(2Benedetto<sup>[7]</sup>, 2-Kye<sup>[11]</sup>, 4Benedetto<sup>[13]</sup>)와의 오차성능(BER)을 비교한 것인데, 성능에 커다란 변화가 있음을 알 수 있다. AWGN 채널 환경에서 각 프레임 길이 256, 512비트에 대한 평균 이득은 약 0.4dB 정도의 성능 향상을 보였고, 1024, 4096비트는 약 0.8 dB 정도의 이득을 보여 프레임



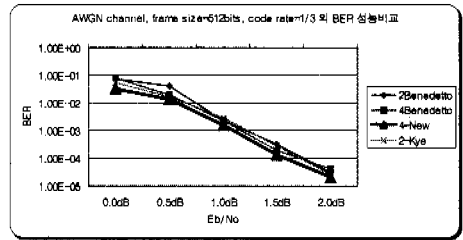
(a) 프레임 길이 256 bit에서의 오차 성능



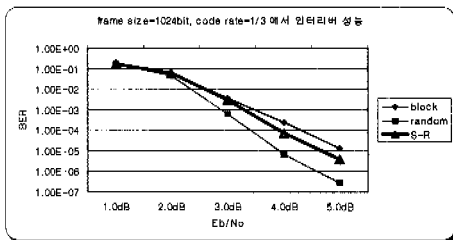
(a) 프레임 길이 256 bit에서의 오차 성능



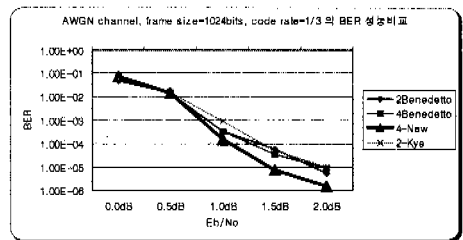
(b) 프레임 길이 512 bit에서의 오차 성능



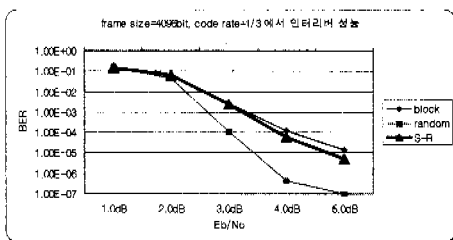
(b) 프레임 길이 512 bit에서의 오차 성능



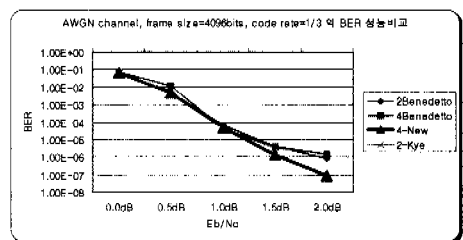
(c) 프레임 길이 1024 bit에서의 오차 성능



(c) 프레임 길이 1024 bit에서의 오차 성능



(d) 프레임 길이 4096 bit에서의 오차 성능



(d) 프레임 길이 4096 bit에서의 오차 성능

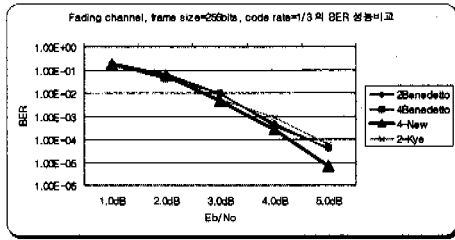
그림 6. 페이딩 채널 환경에서의 각 인터리버에 대한 성능 비교 (Iteration Number: 5, K: 3, Code Rate: 1/3)

그림 7. AWGN 채널 환경에서의 터보 복호화에 따른 성능 (Maximum Eb/No: 2.0dB, Iteration Number: 5, K: 3, Code Rate: 1/3)

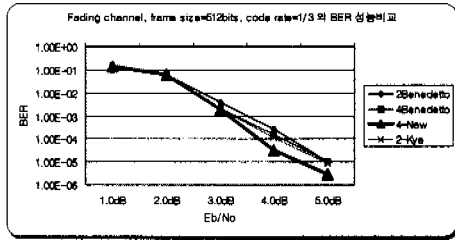
사이즈가 증가할수록 제안한 4-New 복호화의 성능 향상이 두드러지게 개선됨을 알 수 있다. 그리고 페이딩 채널 환경에서도 약 0.5~0.85 dB 정도의 꾸준한 성능 개선이 이루어지며, 프레임 사이즈가 증가될수록 점점 뚜렷한 성능 개선이 이루어짐을 알 수 있다.

## Ⅶ. 결론

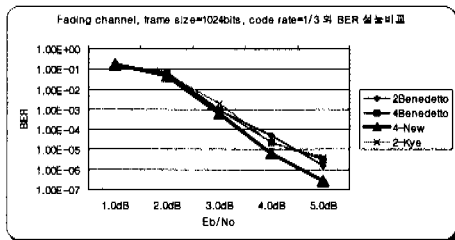
본 논문에서는 CDMA 채널 환경에서 사용되는 Turbo Code에 대해 기존의 블록 인터리버를 변형한 S-R 인터리버를 제안하고, 복잡도는 2배로 증가하나 성능을 개선하고 복호 지연을 감소시킨 4-New



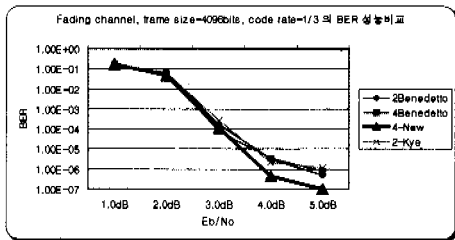
(a) 프레임 길이 256 bit에서의 오차 성능



(b) 프레임 길이 512 bit에서의 오차 성능



(c) 프레임 길이 1024 bit에서의 오차 성능



(d) 프레임 길이 4096 bit에서의 오차 성능

그림 8. 페이딩 채널 환경에서의 터보 복호화에 따른 성능 (Maximum Eb/No: 5.0dB, Iteration Number: 5, K: 3, Code Rate: 1/3)

병렬 터보 복호화기를 제안하였다. 이를 통해 제안한 S-R 인터리버를 사용한 경우 짧은 프레임 사이즈에 주로 적용하는 블록 인터리버보다는 성능이 개선됨을 알 수 있었지만 프레임 사이즈가 큰 경우에는 랜덤 인터리버보다 낮은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 제안한 4-New 복호화기 구조는 기존의

유사한 터보 복호화기와 비교하여 하드웨어의 복잡도는 2배로 증가하나 성능은 향상시키고, 복호 지연을 개선시켜 실시간 통신 및 신뢰성이 요구되는 통신 시스템에도 어느 정도 적용할 수 있으리라 본다. 앞으로의 연구 과제는 현재의 반도체 기술의 발전에 부응하여 신뢰성이 요구되는 시스템에 적용하기 위해 하드웨어의 복잡도를 어느 정도 고려하고 성능은 획기적으로 향상시키기 위한 연구가 이루어져야 하고, 복호 지연을 더욱 더 감소시키기 위한 알고리즘의 연구 및 프레임 사이즈에 가변적으로 적용할 수 있는 인터리버에 대한 연구도 이루어져야 한다.

### 참고 문헌

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima. "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo Codes," in ICC, pp. 1064-1070, 1993.
- [2] P. Robertson, Improving decoder and code structure of parallel concatenated recursive systematic (turbo)codes, in *Proc., IEEE ICUPC* . pp. 183-187, 1994.
- [3] Peter Jung, "Comparison of Turbo Code decoders Applied to Short Frame Transmission Systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 14, No. 3, April 1996.
- [4] Matthew C. Valenti, Iterative detection and decoding for wireless communications, *Ph.D. Dissertation*, Virginia Polytechnic Institute and State Univ, Sept. 1998.
- [5] Eric K. Hall and Stephen G. Wilson, Design and analysis of turbo code on Rayleigh fading channels, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.16, pp. 160-174, Feb. 1998.
- [6] 강경우, 박노진, 강철호, "감소된 복호 지연을 갖는 SOVA 기반 터보 부호에 관한 연구," 2000년 제 13회 신호처리합동학술대회 논문집, Vol. 13, No. 1, 2000년 9월.
- [7] S. Benedetto and G. Montorsi, "Design of Parallel Concatenated Convolutional Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, iss. 5, pp. 591-600, June 1996.
- [8] D. Wang and H. Kobayashi, "On Design of Interleavers with Practical Size for Turbo

Codes," International Conference On Communications, Vol. 2, pp. 618-622, 2000.

- [9] P. Jung and M. Nasshan, Designing Turbo-Codes for Speech Transmission in Digital Mobile Radio Systems , in Proc. ICT95, Bali, pp.180-183, 1995.
- [10] Berrou. C., Glavieux. A., "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding : Turbo Codes", IEEE Transaction on Communications, Vol. 44, No. 10, pp. 1261-1271, 1996.
- [11] 제환원, 구정우, 송홍엽, "병렬구조 복호기에서 LLR의 합을 사용한 터보 부호의 성능분석", 한국통신학회 논문지, 제 24권, 제 11A호, pp. 1678-1684, 1999.
- [12] L. R. Bahl *et al.*, Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate, *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. IT-20, Mar. pp. 248-87, 1974.
- [13] S. Benedetto, D.Divsalar and F.Pollara., Soft-Output Decoding Algorithm in Iterative Decoding of Turbo Codes , TDA progress rep. 42-124, Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, Feb. 15, pp. 63-86, 1995.

박 노 진(No-jin Park)

정회원



1992년 2월 : 서울 산업대학교  
매체공학과 학사  
1998년 2월 : 광운대학교  
전자통신공학과 공학석사  
1998년 3월~현재 : 광운대학교  
전자통신공학과 박사수료

<주관심 분야> CDMA, 통신 신호처리, 채널 코딩

강 철 호(Chul-ho Kang)

정회원



1975년 2월 : 한양대학교  
전자공학과 공학사  
1979년 2월 : 서울대학교  
전자공학과 공학석사  
1977년~1981년 : 국방과학  
연구소(연구원)

1988년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사  
1994년 4월~현재 : 광운대학교 전자공학부 정교수  
<주관심 분야> 통신 및 음성 신호처리, 이동통신