

다양한 복호기의 구조를 갖는 터보 부호의 성능 분석

계환원^{*}, 송홍엽^{**}

Performance analysis of turbo codes for various decoder structures

Hwan won Kye^{*}, Hong-Yeop Song^{**}

요 약

터보 부호의 복호기는 복호화 알고리즘으로 MAP 알고리즘이나 SOVA 알고리즘을 이용하는 2개의 SISO(soft input soft output) 복호기가 직렬 모드로 연결되어져서 반복적으로 정보들을 서로 교환하는 구조이다. 그러나 만약 병렬 모드로 복호기가 구성된다면 직렬 모드에 비해 더 많은 출력 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문은 병렬 모드의 복호기 구조를 변형함으로써 성능의 개선을 얻을 수 있는 방법들을 제안한다. 바로 두 복호기들의 LLR 출력값을 더하는 방법과 두 복호기의 외부 정보의 평균값을 이용하는 방법이며 이렇게 제안한 방법과 일반적인 터보 부호의 성능과 비교, 분석한다.

ABSTRACT

The decoders of turbo codes realized either using MAP algorithm or SOVA algorithm have the structures that two SISO(soft input soft output) decoders are concatenated in serial mode and exchange informations among each other. But if they are connected in parallel mode, more informations than in serial mode can be obtained. So this paper proposes the parallel decoder structures slightly modified in order to achieve performance improvement. The proposed methods are using the LLR outputs of two decoders and using the extrinsic informations of two decoders and compared with the performance of general turbo codes.

I. 서 론

무선통신 채널에서는 다중경로, 간섭, 잡음 등으로 인해 수신단에서 신호는 왜곡된다. 디지털 시스템에서 이러한 신호의 왜곡으로부터 전송하는 정보를 보호하기 위해서 오류 정정 부호는 요

소 기술이다. 1993년 Berrou등에 의해서 발표된 터보 부호(Turbo Code)는 병렬 연접 길쌈 부호화와 SISO 복호화 알고리즘을 적절히 결합한 새로운 부호로서 그 성능의 우수함으로 인해 많은 연구의 대상이 되고 있다. 비교적 간단한 구성 부호들을 이용하지만 Shannon's limit에 근접하며 AWGN 채널에서 큰 길이의 프레임(65,532)과

* 연세대학교 전자공학과 부호 및 정보이론 연구실(shalom@eve.yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 전자공학과 부호 및 정보이론 연구실(hysong@bubble.yonsei.ac.kr)

※ 본 논문은 한국과학재단 특성기초연구(과제번호 97-0100-0501-3) 지원사업에 의한 결과입니다.

인터리버를 이용할 때 E_b/N_0 가 0.7dB에서 약

10^{-5} 정도의 비트 오류율을 갖는다[1][2].

터보 부호를 설계할 때 중요하게 다루어지는 사항들이 있다. 먼저 어떤 형태의 구성 부호화기를 사용하여 부호율을 얼마나 할 것인가의 부호화기 선택의 문제이다. 또한 부호화기의 입력으로 들어가는 정보를 어떤 방식으로 인터리빙 시킬 것인가의 문제이다. 그리고 정보들이 프레임 단위로 전송될 때에 프레임 크기를 결정하는 것과 본 논문의 연구 주제인 복호기의 구조에 관한 문제 등이 있다.

지금까지 길쌈부호의 복호화시에 사용되는 Viterbi 알고리즘은 수신 시퀀스의 오류를 최소화하는 데에는 최적의 방법이지만 심벌단위의 bit probability 또는 soft 출력을 만들 수가 없었다. 그러나 터보 부호는 MAP(maximum a posteriori)알고리즘이나 SOVA (soft output Viterbi algorithm)알고리즘을 이용하며 수신된 시퀀스에 대해 비트 단위의 LLR(log likely ratio)를 soft 값으로 발생시켜서 다른 복호기의 priori 정보로 사용할 수 있게 한다. 이러한 터보 복호화의 일련의 과정은 피드백 루프를 통해 반복적으로 수행되며 오류 정정은 반복횟수에 비례해서 증가한다.

일반적인 터보 복호기의 구조는 2개의 복호기가 직렬 모드로 연결되어져서 반복적으로 정보를 서로 교환하는 구조이나 본 논문은 복호기들을 병렬 모드로 구성할 때 직렬 모드에 비해서 더 많은 정보를 이용할 수 있는 점을 이용해 성능의 향상을 얻을 수 있는 방법을 제안했다. 즉 병렬 모드에서 각각의 두 복호기로부터 동시에 발생된 최종적인 LLR(log likelihood ratio) 출력값들을 변형하면 새로운 LLR 출력 시퀀스가 만들어지는데 이것을 복호화하면 하나의 복호기의 LLR 출력값으로부터 복호화 하는 기준의 것보다 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 이와 비슷하게 두 복호기의 외부 정보의 평균값을 이용해서 복호화하는 방법도 제안한다.

2장에서는 일반적인 복호기들의 구조와 형태를 다루게 되고 3장에서는 본 논문에서 제안한 복호기를 소개한다. 4장에서는 모의 실험을 통해 기존의 터보 부호의 복호기에 대한 성능과 새로 제안한 복호기와의 성능을 비교, 분석한다. 마지막으로 5장에서는 4장까지의

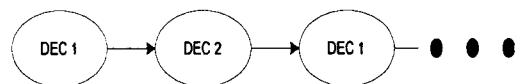
결과를 정리하고 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

II. 터보 부호의 복호기 [3][4][5]

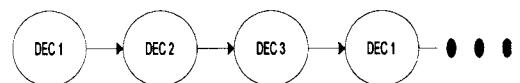
터보 부호의 복호기는 구성 부호화기와 같은 수가 서로 정보를 주고 받도록 연결되어 있다. 1993년에 발표된 Berrou의 논문과 같이 터보 부호의 구조는 2개의 구성 부호가 쓰일 때 복호기는 직렬 모드(serial mode)로 연결되어 있다. 그러나 구성 부호가 다중일 경우 최적의 MAP 알고리즘을 기초로 하는 복호기는 병렬 모드(parallel mode)로 연결되어져야 한다.[3]

2.1 직렬 모드(serial mode)의 복호기

[2]에서 제안된 2개의 구성 부호를 사용하는 터보 부호에 대한 복호화 개념이 그림 1의 (a)에 나와있다. 이것은 직렬 모드로 동작한다. 즉 Dec 2 가 동작하기 전에 Dec 1이 정보들을 처리해서 출력값을 넘겨주고 Dec 2 는 다시 출력값을 Dec 1 에 넘겨주는 과정을 반복한다. 이렇게 직렬 모드의 복호화 개념을 구성 부호가 3개일 때로 확장해 보면 그림 1의 (b)와 같다. 이러한 개념은 구성 부호가 3개 이상인 다중 터보 부호에 대해서도 적용된다.



(a) 2개의 구성 부호화기인 경우



(b) 3개의 구성 부호화기인 경우

그림 1. 직렬 모드

2.2 혼합 모드(mixed mode)의 복호기

구성 부호가 3개 이상이면 그림 2처럼 다른 방법으로 복호화 할 수 있다. 여기서 Dec 1 은 나머지 두 개의 복호기들과 연결되어 정보를 교환 하지만 나머지 복호기 Dec 2와 Dec 3 들은 서로 연결되지 못하므로

정보를 교환할 수 없다. 이 방법은 직렬 모드와 병렬 모드가 혼합된 방법으로서 첫 번째로 동작하는 복호기를 제외한 모든 복호기는 병렬 모드로 연결되어 있다.

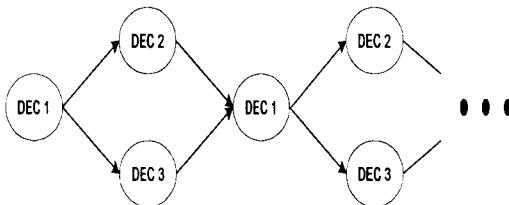


그림 2. 혼합 모드

2.3 병렬 모드(parallel mode)의 복호기

또 다른 복호화 개념으로는 그림 3과 같이 병렬 모드인데 어떠한 시간에서도 모든 복호기가 병렬로 동작한다. 병렬 모드에서는 이전 시간의 자기 자신으로부터 오는 정보는 받지 않는데 그 이유는 복호화 과정이 진행되면서 positive 피드백이 되어 오히려 성능이 감소하기 때문이다.

병렬 모드를 구성 부호가 3인 경우에 적용해 보자. 이진 정보 u_k 가 $u_k = \{0, 1\}$ 이고 정보 시퀀스가 $u = \{u_1, \dots, u_N\}$ 이면 수신 정보 시퀀스 y 가 주어질 때 시간 k 의 정보 비트 u_k 에 대한 복호기의 LLR 출력값 L_k 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_k &= \log \frac{P(u_k = 1|y)}{P(u_k = 0|y)} \\ &= \log \sum_{\substack{u: u_k=1 \\ u: u_k=0}} P(y|u) + \log \frac{P(u_k = 1)}{P(u_k = 0)}. \quad (2-1) \end{aligned}$$

식 (2-1)은 최적의 MAP 알고리즘을 이용하고 정보의 확률이 같다면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} L_k &= \log \frac{\sum_{u: u_k=1} P(y_0|u)P(y_1|u)P(y_2|u)P(y_3|u)}{\sum_{u: u_k=0} P(y_0|u)P(y_1|u)P(y_2|u)P(y_3|u)} \\ &= \tilde{L}_{0k} + \tilde{L}_{1k} + \tilde{L}_{2k} + \tilde{L}_{3k}. \quad (2-2) \end{aligned}$$

여기서 정보 시퀀스 u 는 $x_i = \{x_{i1}, \dots, x_{iN}\}$ 로 부호화되며 x_0 는 u 와 같다 ($i = 0, 1, 2, 3$). 또한 대응하는 수신 시퀀스는 y_i 이다 ($i = 0, 1, 2, 3$). 그리고 \tilde{L}_0 는 정보 시퀀스에 관계된 값 $\tilde{L}_0 = 4ay_0E_S/N_0$ 이고 \tilde{L}_i 는 i 번째 복호기의 출력값에서 모든 입력 정보를 뺀 외부 정보 시퀀스이다. 여기서 a 는 페이딩 진폭이다.

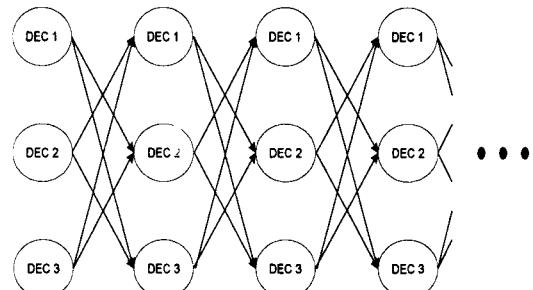


그림 3. 병렬 모드

다중 부호의 복호화 알고리즘으로 쓰이는 병렬 모드는 구성 부호가 2개 일 때도 적용될 수 있다. 그림 4는 2개의 구성 부호에 대한 병렬 모드 구조이다. 2개의 부호에 대한 병렬 모드는 2개의 패스가 서로 분리되어 있는 형태이므로 그림 1의 (a)처럼 직렬 모드로 간소화 될 수 있다. 그림 5는 2개의 구성 부호에 대한 병렬 모드 복호기이다.

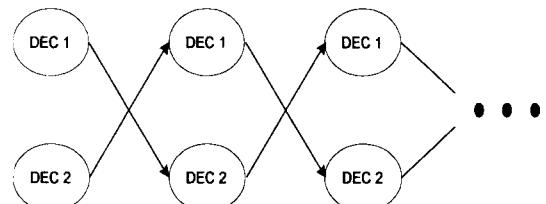


그림 4. 2개의 구성 부호에 대한 병렬 모드

III. 제안한 복호기의 구조

2개의 구성 부호의 경우 병렬 모드의 개념은 그림 4와 같다. 그런데 2개의 패스가 서로 분리되어 있기

때문에 각각의 패스를 따로 생각해 보면 그림 6처럼 2개의 직렬 모드 A와 B로 생각할 수 있다. 직렬 모드의 복호기는 패스 A 나 B중에서 한 경우만을 선택해서 복호화를 하지만 병렬 모드는 두 가지의 패스 모두에 대한 복호화가 동시에 진행된다. 따라서 일정한 횟수의 반복적인 복호화 과정이 진행된 후에 복호기의 출력값을 강 판정해서 정보 비트의 값을 결정할 때 직렬 모드는 A나 B중 한 경우의 출력값 만을 사용한다. 그러나 병렬 모드는 A와 B의 서로 다른 값의 분포를 갖는 2 개의 출력값 모두를 사용할 수 있다. 따라서 병렬 모드는 이 2 가지 패스의 결과값을 적절히 이용하면 한 가지의 결과값 만을 이용할 수 있는 직렬 모드에 비해 정보 비트에 대한 정보를 더 많이 가지고 있게 된다. 본 논문은 이러한 개념을 가지고 간단한 변경만으로 성능의 향상을 줄 수 있는 복호기를 제안 한다.

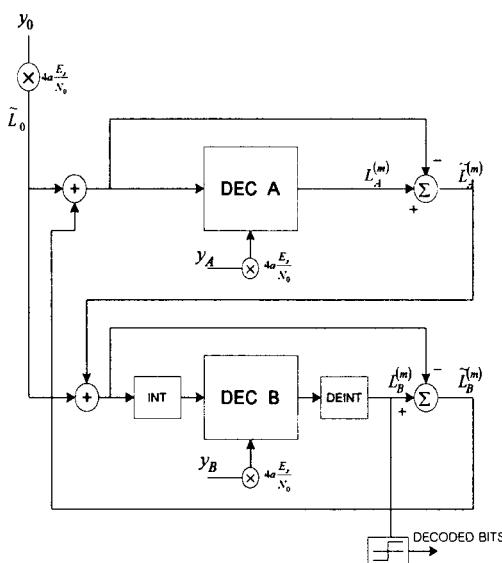


그림 5. 2개의 구성 부호에 대한 병렬 복호기

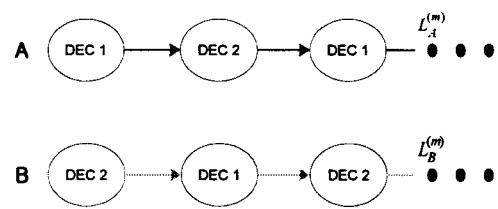


그림 6. 2개의 구성 부호에 대한 병렬 모드의 분리 형태

3.1 LLR의 합을 이용한 복호기

그림 6에서 $L_A^{(m)}$ 는 m 번의 반복 복호화가 진행된 패스 A의 LLR 출력값이다. $L_B^{(m)}$ 는 패스 B의 LLR 출력값이다. 반복 횟수 m 에서 출력 시퀀스 $L_A^{(m)}$ 와 $L_B^{(m)}$ 는 서로 다른 값들의 분포이다. 따라서 위의 출력 시퀀스들을 강 판정한 각각의 시퀀스 $\hat{u}_A^{(m)}, \hat{u}_B^{(m)}$ 와 정보 시퀀스 u 와 비교해서 생기는 오류를 계산해 보면 2개의 패스의 오류값들이 서로 다르다. 즉 경우에 따라서 $\hat{u}_A^{(m)}$ 가 $\hat{u}_B^{(m)}$ 보다 u 에 더 비슷한 값의 분포를 갖을 수도 있고 반대의 경우가 될 수도 있다. 일반적으로 $\hat{u}_A^{(m)}$ 와 $\hat{u}_B^{(m)}$ 의 분포들은 서로 다르지만 반복 횟수 m 이 증가할수록 두 값은 신뢰도가 높아지는 분포로 새롭게 생성되고 또 서로 비슷한 분포를 갖게되며 u 와도 비슷해져서 결국 오류가 줄어든다.

그런데 시퀀스 $L_A^{(m)}$ 와 $L_B^{(m)}$ 를 비트 단위로 서로 비교해 보면 sign이 서로 같은 비트들과 sign이 서로 반대인 비트들로 되어있다. 따라서 이 두 시퀀스들을 더해주면 새로운 시퀀스 $L_{sum}^{(m)}$ 가 만들어지는데 $L_{sum}^{(m)}$ 의 각각의 비트 sign은 $L_A^{(m)}$ 의 비트와 $L_B^{(m)}$ 의 비트 중에서 값이 큰 비트의 sign으로 된다. 두 LLR 시퀀스의 합 $L_{sum}^{(m)}$ 은 다음과 같다.

$$L_{sum}^{(m)} = L_A^{(m)} + L_B^{(m)} \quad (2-3)$$

2개의 패스 시퀀스의 합 $L_{sum}^{(m)}$ 를 강 판정한 시퀀스

$\hat{u}_{sum}^{(m)}$ 은 $\hat{u}_A^{(m)}$ 와 $\hat{u}_B^{(m)}$ 에 비해서 더 작은 오류값을 갖는 분포라는 사실이 본 논문의 실험을 통해 밝혀졌다. 이러한 개념을 가지고 복호기를 변형하면 그림 7과 같다. 이 제안된 복호기는 MAP 알고리즘과 SOVA 알고리즘에 대해서 모두 좋은 성능의 향상이 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 외부 정보의 평균을 이용한 복호기

3.1절에서 제안한 복호기는 병렬 모드의 LLR 출력 시퀀스를 더해주는 방법이었다. 본 절에서는 2개의 LLR 출력값에서 각각의 복호기로 들어간 입력 정보들을 모두 빼준 외부 정보들을 이용한다. 그림 7의 외부 정보 $L_A^{(m)}$ 와 $L_B^{(m)}$ 는 서로 다른 분포들을 갖는 시퀀스들이다. 복호화의 반복 횟수가 증가할수록 2개의 외부 정보 시퀀스들은 오류를 더욱 줄일 수 있는 값의 분포들로 수렴한다. 따라서 본 절에서 제안하는 방법은 2개의 외부 정보들을 적절히 변형해서 신뢰성 있는 외부 정보들을 새롭게 만들어 사용하는 것으로 다음처럼 진행된다. 반복 횟수 $m-1$ 만큼 병렬 모드로 복호화를 진행하다가 마지막 횟수 m 에 이르면 이전 시간의 복호화 때에 두 복호기로부터 발생된 외부 정보 시퀀스 $L_A^{(m-1)}$ 와 $L_B^{(m-1)}$ 의 평균을 취한다. 그러면 새로운 시퀀스 $L_{avr}^{(m-1)}$ 가 만들어 지는데 이것을 마지막 m 번째의 복호화때에 두 복호기의 priori 정보로 각각 이용하는 것이다. 그리고 마지막 m 번의 모든 복호화가 끝나면 3.1절의 그림 7에 사용된 방법을 이용해서 최종적인 LLR 출력값 $L_{sum}^{(m)}$ 을 강 판정해서 정보 시퀀스를 복호화한다. 여기서 $L_{avr}^{(m-1)}$ 은 다음과 같이 구한다.

$$L_{avr}^{(m-1)} = \frac{L_A^{(m-1)} + L_B^{(m-1)}}{2} \quad (2-4)$$

이 외부 정보의 평균을 이용하는 방법은 SOVA 알고리즘에 대해서는 LLR의 합을 이용하는 방법과 비교할 때 근소한 성능 이득을 나타내지만 MAP 알고리즘의 경우에는 성능의 이득이 없었다. SOVA 알고리즘에서는 두 외부 정보 시퀀스의 평균을 취한 시퀀스 $L_{avr}^{(m-1)}$ 가 전체적으로 오류를 줄이는 분포들로 간신

되지만 MAP 알고리즘에서는 오히려 $L_{avr}^{(m-1)}$ 이 성능의 열화를 초래하는 분포로 바뀌기 때문이다. 따라서 앞으로 복호기의 출력값들의 분포에 관한 연구가 진행되어져서 적절한 변형으로 더 좋은 성능을 낼 수 있는 복호화 방법이 만들어져야 하겠다.

IV. 실험 결과 및 고찰

4장에서는 3장에서 제안한 복호기와 일반적인 복호기와의 성능을 모의 실험을 통해 비교, 분석한다. 본 논문에서 제안한 터보 부호의 복호기는 2가지 채널에 대해 실험되었는데 채널 모델은 AWGN 채널과 페이딩 진폭이 완전하게 추정된 레일레이 페이딩 채널로 설정하였고 BPSK 변조를 가정하였다. 과거의 많은 실험들은 완전히 인터리빙된(fully interleaved) 페이딩 채널을 가정하였다. 그러나 실제의 많은 경우는 위의 가정과 일치되지 않으므로 본 논문은 완전히 인터리빙되지 않고 심벌간의 상관이 있는 플랫 페이딩 채널을 사용하였으며 도플러 주파수와 심벌 시간과의 곱 ($B_d T_s$)의 변화에 따라 성능을 분석하였다. 일반적으로 터보 부호의 성능은 $(B_d T_s)$ 에 비례한다[6]. 복호화 알고리즘으로는 MAP 알고리즘과 SOVA 알고리즘을 사용하였고 터보 부호의 반복 횟수는 5이고 정보 시퀀스의 프레임 크기는 256, 512, 1024, 4096 비트의 경우에 대해 실험하였다. 터보 부호화기는 모양이 같은 2개의 RSC 부호화기를 사용하였고 부호화기의 피드백 생성 다항식은 $G_0 = (15)_8$ 이고 잉여 비트의 생성 다항식은 $G_1 = (17)_8$ 이며 8진수 형태로 표현하였다. 3개의 구속장의 길이 $K = 3, 4, 5$ 에 대해 실험하였고 인터리버는 m 시퀀스 발생기를 이용한 랜덤 인터리버, 부호율은 1/3과 평처링(puncturing)에 의해서 1/2 이 각각 사용되었다.

4.1 AWGN에서의 성능 변화

그림 8의 (8-a)와 (8-b)에서 사용된 터보 부호의 프레임 길이는 1024이고 구속장이 3이며 부호율이 1/3과 1/2일 때 일반적인 MAP과 SOVA 알고리즘에 대해서 제안된 방법의 성능을 비교한다. 두 그림들에서 점선들은 LLR의 합을 이용하는 방법으로 복호화한 결과이며 "LLR sum"으로 표기했다. E_b/N_0 가 높아지면

서 성능의 향상이 두드러지는 것을 알 수 있으며 MAP과 SOVA의 2가지 경우 모두에 대해서 좋은 성능의 향상이 있음을 알수있다. 또한 복호화시에 SOVA가 MAP보다 제안된 방법으로 인한 상대적인 이득이 많이 나타난다. $p_b = 10^{-4}$ 에서 '부호율이 1/3 일때 SOVA 경우 약 0.4dB의 이득이 나타났으며 MAP은 약 0.15dB의 성능 향상이 있었다. 그럼 9의 (9-a)는 SOVA를 이용할 때 프레임 길이에 따른 성능 결과를 비교하고 있다. 부호율 1/3인 구성 부호화기가 사용되었다. 프레임 길이 N 에 관계없이 제안된 복호기의 성능이 우수함을 알 수 있다. 그럼 9의 (9-b)는 복호화 알고리즘으로 SOVA를 이용하고 프레임 길이가 1024이며 표 1의 구속장을 쓰는 터보 부호이다. 그림 10은 외부 정보의 평균을 이용하는 방법, 즉 "average EI"의 성능을 LLR sum과 비교하고 있다. 제안된 두 방법 모두는 기존의 복호기를 이용하는 방법에 비해 약간의 계산량이 추가적으로 필요하지만 많은 성능의 향상을 가져오는 것을 볼 수 있다. 그리고 SOVA를 이용할 때 average EI는 LLR sum에 비해 성능의 미소한 이득은 있으나 외부 정보의 평균을 구하는 계산 과정이 소요되는 단점이 있으며 MAP의 경우는 average EI의 성능이 일반적인 복호기의 성능에 비해 이득이 없다.

4.2 레일레이 페이딩 채널에서의 성능 변화

그림 11의 (11-a)와 (11-b)에서 사용된 터보 부호의 프레임 길이는 1024이며 구속장의 길이는 3이다. 그리고 부호율이 1/3과 1/2일 때 MAP과 SOVA 각각에 대한 제안된 방법의 성능을 비교한다. $B_d T_s = 0.01$ 인 레일레이 페이딩 채널에서는 MAP 알고리즘의 경우보다 SOVA 알고리즘일 때 제안된 방법으로 인한 성능 향상이 큼을 볼 수 있다. SOVA의 경우 $p_b = 10^{-4}$ 에서 부호율이 1/3일때 약 0.7dB의 이득이 나타났으며 MAP은 약 0.2dB의 성능 향상이 나타났다. 그럼 (11-c)는 구속장의 길이에 따른 성능으로 프레임 길이는 1024이고 부호율은 모두 1/3이며 표 1을 사용했다. 그럼 12는 SOVA 일 때 $B_d T_s$ 의 변화에 따른 average EI의 성능과 LLR sum 성능을 비교하고 있으며 AWGN처럼 두 방법의 성능이 비슷하게 나타난다. $B_d T_s$ 가 0.01과 0.05일때는 일반적인 터보

부호보다 많은 이득을 보이나 0.001처럼 채널의 상태가 열악하고 채널의 페이딩의 속도가 느린 경우는 미소한 성능 향상을 보인다. 그러므로 레일레이 페이딩 채널에서는 채널 파라미터에 따라서 그리고 복호화 알고리즘의 선택에 따라서 각기 다른 정도의 성능의 향상을 보이며 채널의 상태가 좋을수록 성능 향상이 크게 나타난다.

V. 결 론

본 논문은 복호기들을 병렬 모드로 구성할 때 직렬 모드에 비해서 더 많은 정보를 이용할 수 있는 점을 이용해 성능의 향상을 얻을 수 있는 방법을 제안했다. 즉 병렬 모드에서 각각의 두 복호기들의 최종적인 LLR 출력 시퀀스를 더하는 방법과 이와 비슷하게 두 복호기의 외부 정보의 평균값을 이용해 복호화하는 방법을 제안했다.

다양한 실험을 통해서 제안된 두 방법 모두는 기존의 복호기를 이용하는 방법에 비해 약간의 계산량과 복잡도가 추가적으로 필요하지만 성능의 향상을 얻을 수 있었고 MAP 보다는 SOVA 알고리즘에 대해서 더 큰 이득이 얻어졌다. 따라서 앞으로 좋은 성능의 향상을 줄 수 있는 터보 부호의 출력 시퀀스의 분포에 대한 연구가 이루어져야 하겠다.

터보 부호는 반복적인 복호화의 형태로 직렬 연접 부호와 부호어의 등화기등등 다양한 분야에도 응용될 수 있으며 큰 프레임의 경우 HDTV(high definition TV)같은 분야에 대한 연구가 진행중이다. 현재 터보 부호는 IMT-2000에서 길쌈 부호, RS 부호와 길쌈 부호의 직렬 연접 부호와 함께 오류 정정 부호의 표준안 중의 하나로 제안되고 있는데 이를 위해서는 보다 간단한 복잡도와 시간 지연이 적은 복호화 방법에 대한 연구가 이루어 졌어야 한다.

참고 문헌

- [1] C.Berrou, A.Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding:turbo-codes," in Proc. ICC'93, pp. 1064-1070
- [2] C.Berrou, A.Glavieux, and P.Thitimajshima, "Near optimum error correcting:coding and

decoding Turbo-Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol.44, no.10, pp.1261-1271, Oct. 1996

- [3] D.Divsalar and F.Pollara, "Turbo Codes for PCS Applications", *Proc ICC95*, Seattle, WA, June 18-22, 1995
- [4] 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, 1995, pp. 63-86
- [5] D.Divsalar and F.Pollara, "Multiple Turbo Codes for Deep-Space Communications", TDA progress rep. 42-121, Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, May 15, 1995, pp. 66-67
- [6] 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.

표 1. 각 구속장에서의 생성 다항식

구속장의 길이 '(K)	생성 다항식	
	G_0	G_1
3	$(7)_R$	$(5)_R$
4	$(15)_R$	$(17)_R$
5	$(23)_R$	$(35)_R$

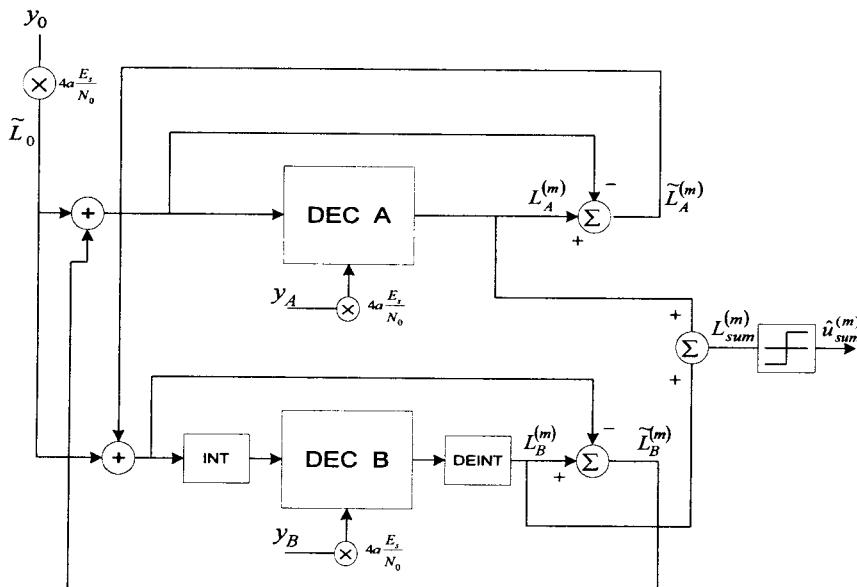
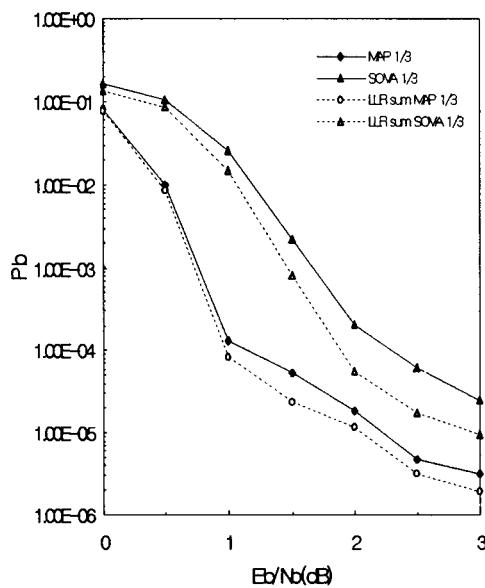
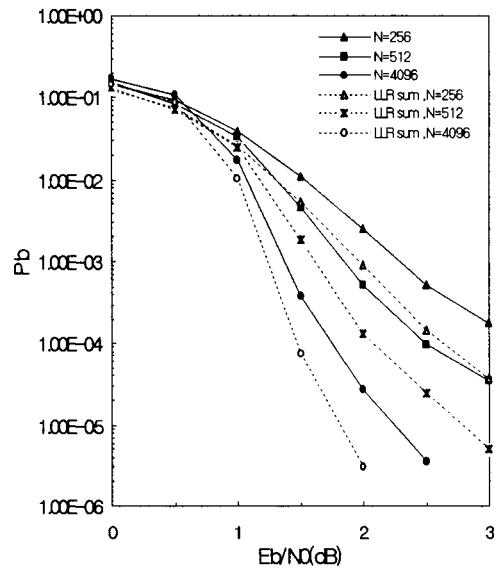


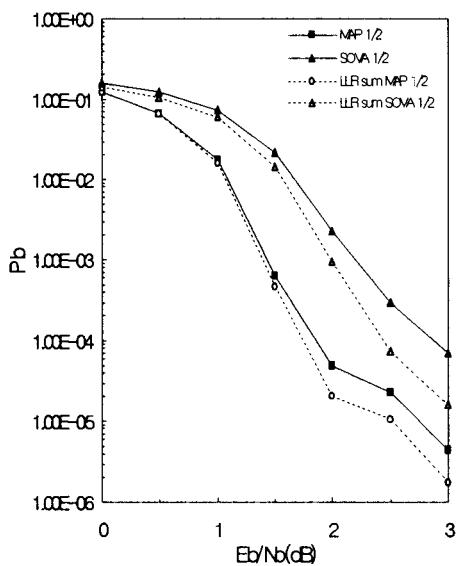
그림 7. 제안한 2개의 구성 부호에 대한 병렬 복호기



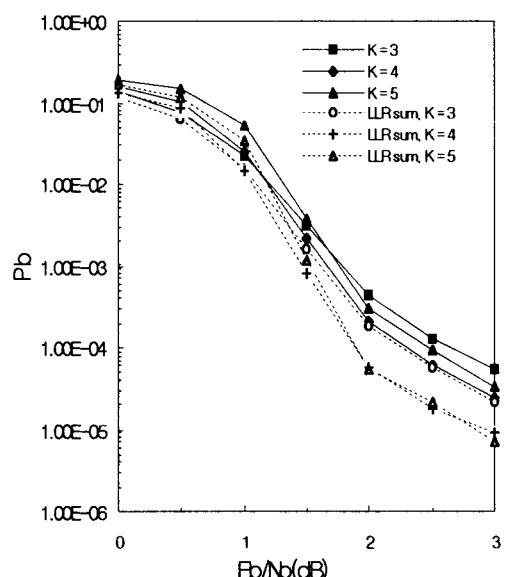
(8-a) 부호율이 1/3인 경우



(9-a) 프레임 길이에 따른 성능
(부호율 1/3)



(8-b) 부호율이 1/2 인 경우



(9-b) 구속장의 길이에 따른 성능(부호율 1/3)

그림 8. LLR 합을 이용하는 복호기의 성능

그림 9. SOVA 인 경우 LLR의 합을 이용하는
복호기의 성능

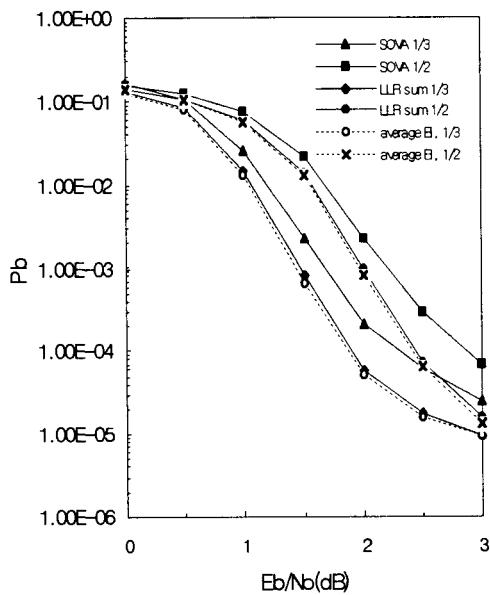
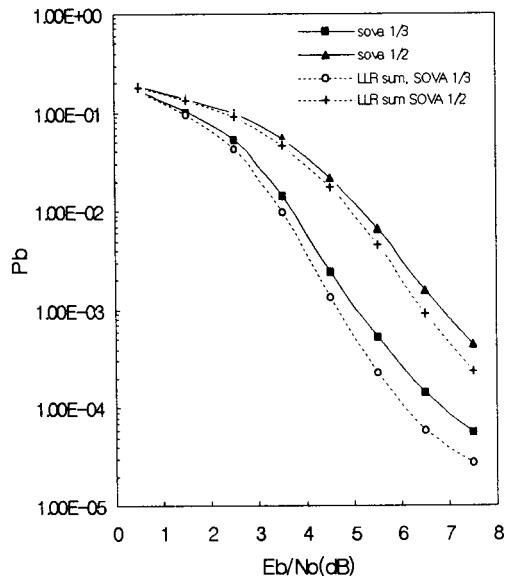
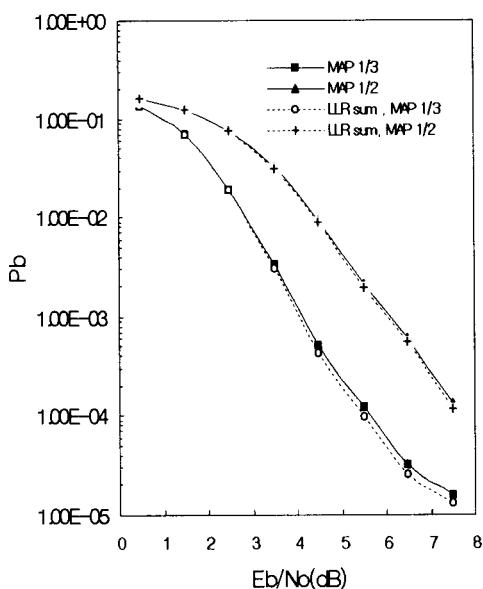


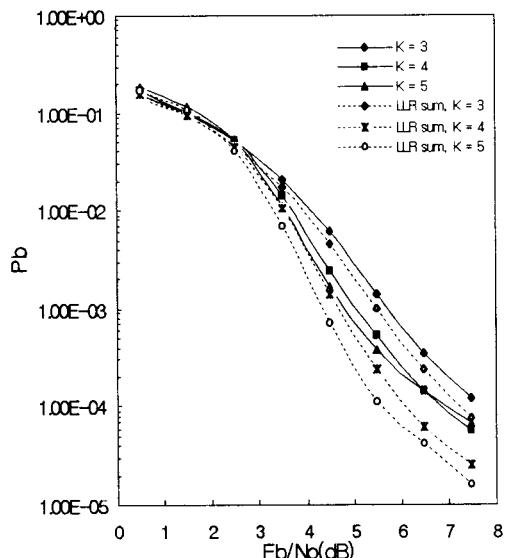
그림 10. SOVA 일 때 LLR 합과 외부 정보의 평균을 이용하는 복호기의 성능



(11-b) SOVA인 경우 부호율에 따른 성능



(11-a) MAP 인 경우 부호율에 따른 성능



(11-c) SOVA 인 경우 구속장의 길이에 따른 성능 (부호율 1/3)

그림 11. $B_d T_s = 0.01$ 일 때 LLR의 합을 이용하는 복호기의 성능

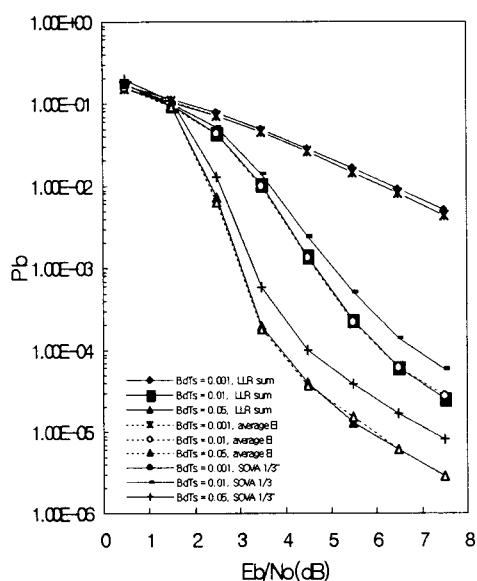


그림 12. SOVA 인 경우 LLR의 합과 외부
정보의 평균을 이용하는 복호기의 성능