

터보 부호 원리 및 응용

김진영 | 허 준

광운대학교 · 고려대학교

요 약

터보 부호는 AWGN 환경에서 비교적 간단한 복호 알고리즘을 가지면서 낮은 신호대 잡음비에서 뛰어난 에러 성능을 보이는 채널부호이다. 터보 부호는 기본적으로 길쌈 부호를 병렬 연결하는 방식으로, 두 개 이상의 구성 부호화기에 같은 시퀀스의 서로 다른 배열을 적용하는 것이다.

본 논고에서는 터보 부호화 및 복호화의 기본 원리에 대하여 설명하고, 이를 여러 형태의 무선 채널에 적용하는 기술에 대하여 언급하고자 한다. 그리고 연구 방향에 대하여 간략히 제시하고자 한다.

1. 서 론

통신의 발전과 더불어 이동통신이 보편화됨에 따라 지구국과 단말기간의 무선 통신 환경에서 발생하는 에러를 최소화하고자 하는 요구가 증가하고 있다 [1-3]. 이러한 요구를 충족시키기 위해서 채널 부호를 연구하는 많은 연구자들은 Shannon의 한계에 근접하는 성능을 갖는 부호를 찾으려고 노력하여 왔다 [4].

이를 위하여 여러 가지 복잡한 규칙에 따라 생성된 성능이 좋은 부호들이 제안되었으며, 복잡도는 낮으면서 효과적으로 복호 가능한 부호화 기법의 개발에 노력을 기울여 왔다.

1990년대 초 Berrou 등에 의해 제시된 터보 부호 (Turbo code)는 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 환경에서 비교적 간단한 복호 알고리즘을 가지면서 18번의 반복 복호 시에 사는 성능 [5]과 0.7dB 차이를 갖는 낮은 신호대 잡음비 (SNR : signal to noise ratio)에서 비트오류율 (BER : Bit Error Rate) 이 10⁻⁵ 이라는 획기적인 성능을 보임으로써 많은 관심을 불러 일으켰다 [6-7]. 그 후로 터보 부호화 기법은 페이딩 채널 상에서도 신뢰성을 보장할 수 있는 강력한 부호화 기법으로 입증되어 여러 응용분야에 활용이 되어왔다.

터보 부호는 기본적으로 길쌈 부호 (convolutional code)를 병렬 연결하는 방식으로 [8-9], 이것은 두 개 이상의 구성 부호화기 (component encoder)에 같은 시퀀스의 서로 다른 배열을 적용하는 것이다. 즉 원래 연구되어 오던 직렬 연결 부호는 전송하고자 하는 시퀀스에 하나의 부호를 적용하여 부호화한 다음 이 부호화된 시퀀스에 다른 부호를 적용하여 다시 부호화하는 이중 부호화의 과정이었다던 것에 비해 새로 제안된 터보 부호는 같은 시퀀스를 배열만 바꿔서 서로 다른 부호화기에 적용하는 방법이다.

터보 부호의 복호화는 소프트 출력 반복 복호 (Soft output iterative decoding) 방법을 이용한다. 지금까지 길쌈 부호에서 일반적으로 사용되어온 Viterbi 알고리즘은 시퀀스 오류를 최소화하는 데에는 최적의 방법이었지만 비트 단위의 정보를 발생시킬 수는 없었다 [10]. 터보 부호 복호화의 기본 개념이 복호화 기간 내에 각 비트에 대한 정보를 교환하여 이를 다음 복호에 이용함으로써 성능을 향상시키는 것이기 때

본 연구는 광운대학교 2006년도 연구비에 의해 수행되었음.

문에 터보 부호의 복호화 과정에서는 소프트 출력을 얻는 것이 필요하다. 이를 위하여 터보 부호 복호 알고리즘은 1974년 Bahl 등이 제시한 알고리즘을 변형한 것으로 MAP (Maximum A Posteriori) 알고리즘이라 불린다. 이상으로부터 터보 부호는 연접 부호화 소프트 출력 반복 복호 알고리즘의 개념을 적절히 결합한 새로운 부호화 기법임을 알 수 있다.

본 논문에서는 채널 부호화 방법으로 매우 뛰어난 성능을 나타내는 터보 부호 기술에 대하여 설명하고자 한다. 제 II 장에서는 터보 부호화의 원리에 대해 언급하고, 제 III 장 및 제 IV 장에서는 터보 부호화의 종류 및 터보 부호의 복호화 방법에 대하여 고찰할 것이다. 그리고 채널을 각각 무선 전송로, 위성 전송로, 광 전송로, 적외선 전송로로 나누어 터보 부호화를 응용하는 기술에 대하여 제 V 장에서 다루고, 제 VI 장에서 결론을 제시하고자 한다.

II. 터보 부호화 원리

단순화한 터보 부호의 한 종류로 두 개의 컨볼루션 부호화기를 병렬로 연결 시켜 놓은 터보 부호화기가 있다. 입력 정보들은 두 번째 부호화기로 들어가기 전에 스크램블 된다. 터보 코드의 코드워드들은 (그림 1)에 나타나 있는 것처럼 첫 번째 부호화기로부터 생성된 패리티 체크 비트에 따르는 입력비트 (규칙적인 비트들)와 두 번째 부호화기로부터 얻어진 패리티 비트들로 구성된다.

(그림 1)의 간단한 터보 부호화기는 오직 두 개의 가지를

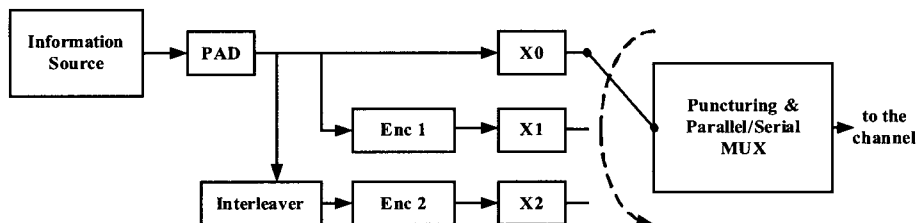
갖고 있다. 일반적으로 다중 터보 부호화기는 두 개 이상의 가지를 가질 수 있는데, 각 가지들에 위치한 컨볼루션 부호화기는 성분 부호로 일컬어 진다. 그리고 각각의 성분 부호들은 유사하거나 또는 다른 부호의 발생 함수를 포함할 수도 있다. 본 논고에서는 같은 성분 부호를 갖는 두 개의 가지의 구조에 대해 살펴보기로 한다.

(그림 1)에 나타나 있는 PAD는 부호화기로 들어오는 모든 정보 비트들에 '0'의 신호를 적절히 덧붙이는 역할을 한다. 이것은 만약 처음과 마지막 비트들을 사용하게 되면 컨볼루션 부호화기는 블록 부호를 발생시킬 수 있기 때문이다. 만약에 오직 하나의 부호화기만을 이용한다면 꼭 필요한 마지막 비트는 메모리 차수 'm'과 같은 길이를 갖는 연속적인 '0'의 비트들이 된다 [11].

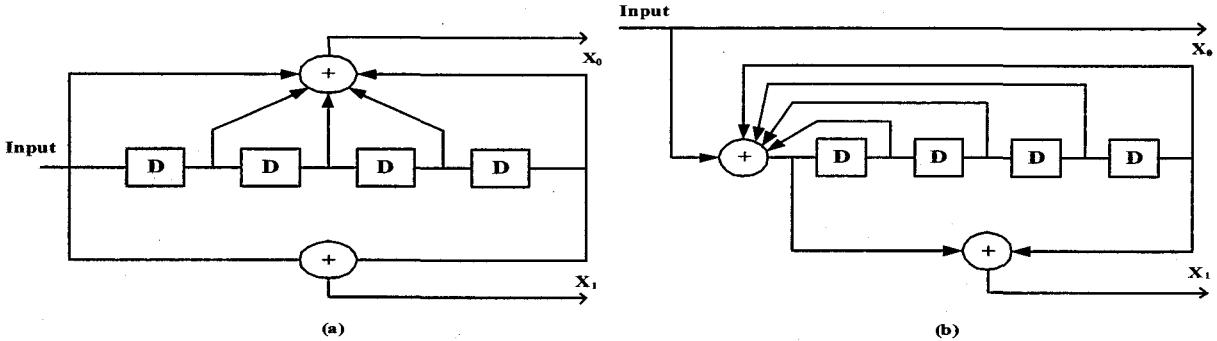
일반적으로 첫 번째 부호화기 전에 또 다른 인터리버를 가질 수 있지만 대개 인터리버는 그 인터리버의 지연에 해당하는 만큼의 지연 라인으로 대체되며 이것은 각각의 가지들이 동시에 작업을 수행할 수 있도록 해 준다. Puncturing은 기본 구조를 가지는 부호화기의 부호비율을 넘어선 컨볼루션 부호비율을 가능하게 해 준다. 나뉜 구역은 인터리빙과 평처링이 전담한다. 귀납적 부호라 일컬어 지는 어떤 부호들은 내부의 천이 레지스터의 상태에 따라 과거의 출력 부호들에 의존한다.

(그림 2)는 귀납적인 규칙적인 부호들에 대응하는 비 귀납적이고 비 체계적인 컨볼루션 부호들을 나타낸다.

X_0 와 X_1 은 체크 비트들이고 체계적인 컨볼루션 부호화기에서는 출력비트들 중 하나인 X_0 가 정확히 연속적인 입력 비트들과 같게 된다. 터보 부호에서는 귀납적인 체계적 컨볼루션 부호화 방법이 비 귀납적인 터보 부호화 방법에 비해서



(그림 1) 간단한 터보 부호화기 구조



(그림 2) (a) 비 귀납적인 비 체계적 부호, (b) 귀납적인 체계적 부호

더 효과적인 성능을 나타낸다 [6, 9]. 귀납적인 체계적 컨볼루션 부호화기는 출력비트들 중 하나를 피드백하여 입력 신호와 같게 함으로서 비 귀납적인 비 체계적 부호화기를 얻을 수 있다. 격자배열과 자유 거리 또한 앞선 두 개의 부호와 같게 된다 [6]. 물론 두 개의 함수 발생기가 서로 같지 않기 때문에 출력 비트들은 두 개의 입력 비트들과 같게 대응되지는 않는다.

병렬 연결 컨볼루션 부호를 기반으로 한다. 1/2의 부호화율을 갖는 부호화기 두 개를 병렬로 연결시켜 입력 비트들을 부호화 시킨다.

병렬 연결 컨볼루션 부호화기의 구조는 에러율 (BER : bit error rate) 측면에서는 지금까지도 가장 강력한 성능을 보이고 있지만 일정 파워에서 10^{-10} 의 비트 에러율 필요로 하는 시스템에서는 최선의 구조는 아니다.

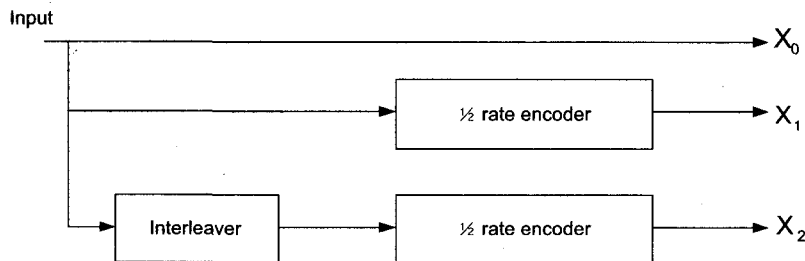
III. 터보 부호화의 종류

1. 병렬 연결 컨볼루션 부호 (PCCC : parallel concatenated convolutional code)

터보 부호의 첫번째 통신 시스템은 (그림 3)에 나타나 있는

2. 직렬 연결 컨볼루션 부호 (SCCC : serial concatenated convolutional code)

직렬 연결 컨볼루션 부호 구조는 [12-14]에서 제안되었다. 직렬 연결 컨볼루션 부호의 한 예로 (그림 4)에 1/3의 부호화율을 갖는 부호화기가 나타나있다. 병렬 연결 컨볼루션 부호화기와 다르게 인터리버의 역할을 다르게 설정함으로써 병렬 구조와 다른 이득을 얻을 수 있다 [14, 15]. 다시 말하면



(그림 3) 병렬 연결 컨볼루션 부호

입력 비트들의 블록 길이를 N 이라 했을 때 병렬 구조에서의 인터리버 에러율 이득은 N^2 이지만 직렬 구조에서는 (그림 4) 이득이 N^3 으로 병렬 구조와 비교했을 때 월등한 에러율 효율을 볼 수 있다.

IV. 터보 복호화의 방법

터보 부호의 복호기는 (그림 5)에서 보는 바와 같이 각각의 구성 부호기에 대응되는 구성 복호기가 인터리버와 역인터리버를 사이에 두고 직렬 연결된 형태로 구현되며 부호기에 서와 같이 프레임 단위로 복호가 이루어진다. 그리고 반복 복호 (iterative decoding)를 하기 위해서 각각의 구성 복호기는 연관정출력 (soft output)이 가능하여야 한다.

(그림 6)은 이러한 터보 부호의 실질적 하드웨어 구현을 표현한 그림이다. 여기서는 복호화 방법으로 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)를 사용한 경우를 나타내었다. SOVA의 구체적인 알고리즘은 다음 단락에서 자세히 언급하기로 한다. (그림 4)에서 보이는 바와 같이 터보 코드 전체 block 중 가장 큰 비중을 차지하는 부분은 복호기 구조가 되고 그러한 구조는 복호 알고리즘에 따라서 크게 달라지게 된다. 따라서 다음 단락에서 복호 알고리즘을 간략히 살펴

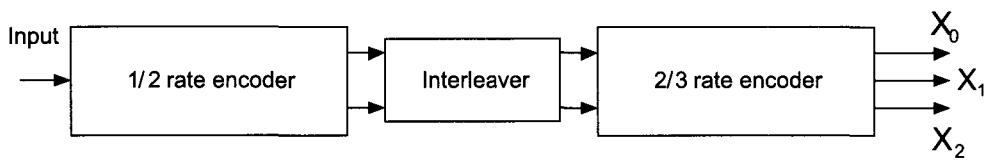
보도록 하겠다.

1. MAP (Maximum a posteriori probability) algorithm

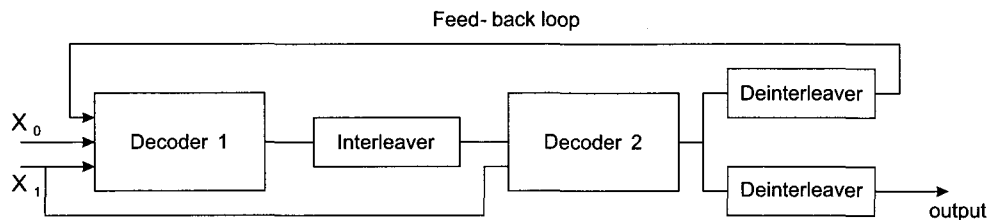
MAP algorithm은 정보 비트의 사후 (a posteriori) 확률 값을 계산하여 이 확률 값이 최대가 되도록 복호하는 방식을 말한다. MAP algorithm은 길쌈 부호 (convolutional code)에 사용하면 성능이 우수하지만 계산량이 많아서 1974년 발표된 이후, 실제 시스템에서 쓰인 적은 거의 없지만 터보 부호가 제안되면서 새롭게 주목을 받게 되었으며, 현재 실제 구현을 위해서 계산량을 줄이기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

2. SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)

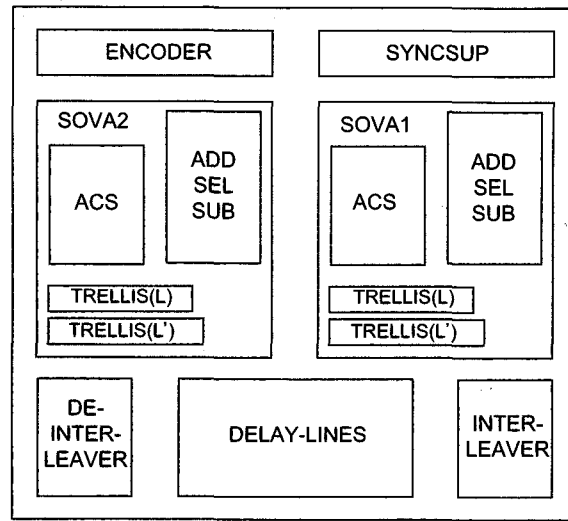
SOVA는 말 그대로 Viterbi algorithm에 바탕을 둔 것으로 기존의 Viterbi algorithm을 적용하여 얻을 수 있는 hard-decision한 값에 신뢰도 값을 더 계산하여 성능을 개선시키는 방식이다. SOVA는 Hagenauer 등에 의해 처음 제안된 이후로 많은 발전된 형태들이 발표되고 있다 [10, 16]. 우선 SOVA는 trellis 상에서 survivor path와 concurrent path의 부호의 동일 여부에 따라 HR (Hagenauer Rule)-SOVA와 BR (Battail Rule)-SOVA로 나누어 생각할 수 있다. 즉, update 과정에서 두 path의 부호가 다른 경우에만 update를 시켜주는



(그림 4) 직렬 연결 컨벌루션 부호



(그림 5) 터보 부호 복호화 구조



(그림 6) Floor-plan of the chip

것이 HR-SOVA이고, 부호가 같은 경우에도 update를 시켜주는 경우가 BR-SOVA이다. 따라서 모든 경우에 대해 update를 시켜주는 BR-SOVA가 HR-SOVA에 비해서는 성능은 우수하지만, 복잡도 측면에서는 단점을 가지게 된다. 그리고 (그림 3)에서도 살펴보았듯이 실제 구현에서 많이 사용되고 있는 방식으로 two-step SOVA를 생각할 수 있다. 이러한 two-step 방식은 Berrou와 Meyr등에 의해 각각 제안되었는데, Two-step SOVA의 기본개념은 decoding depth의 모든 state를 대상으로 update를 시켜주는 기존의 방식들과는 달리 일정길이 동안의 trellis T(L) 동안은 기존의 Viterbi algorithm을 사용해서 ML (maximum likelihood) state를 찾은 후, 나머지 trellis T'(L')동안만 그 결정된 state에서부터 update를 시켜주는 방식이다.

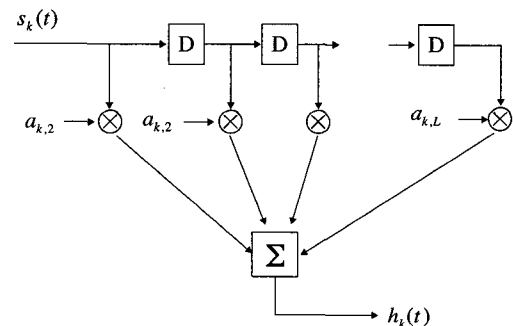
앞에서 간략하게 살펴본 바와 같이 MAP algorithm은 복호를 위해 확률 값을 이용하는 반면 SOVA에서는 Viterbi algorithm과 같이 metric값을 이용한다는 점이 가장 큰 차이점으로 생각할 수 있다. 지금까지 실제적으로 hardware를 제작할 때, 성능은 MAP algorithm에 비해서는 떨어지지만 복잡도 면에서 상당히 우수한 SOVA를 많이 사용해왔지만 최근의 hardware기술의 발달에 따라 MAP algorithm을 사용한 경우도 많이 발표되었다.

V. 터보 부호화의 응용

1. 무선 전송로

무선 전송로는 주파수 선택적인 다중경로 페이딩 채널이고 tapped delay line 모델로 모델링 할 수 있으며 (그림 7)과 같다. 이 채널의 충격응답은 식 5-1과 같다 [3, 17-18].

$$h_k(t) = \sum_{l=1}^L a_{kl}(t)\delta_k(t-ID). \quad (5-1)$$



(그림 7) 다중경로 채널 모델

여기서 L 은 다중경로의 수, D 는 탭 간격, α 는 경로 이득이고 이는 레일레이 분포 (Rayleigh distribution)을 갖는다.

$$p_a(a_k) = 2a_k e^{-2a_k}, \quad a_k > 0. \quad (5-2)$$

전형적인 연속적인 부호는 내측 부호와 외측 부호가 연결된 형태로 이루어져 있다. 대부분의 경우 내측 부호는 간단한 최대 근사 복호가 가능한 비교적 짧은 부호 (일반적으로 콘볼루션 부호)인 반면, 외측 부호는 강력한 대수적 오류 정정 알고리즘을 갖춘 긴 대수적 부호로 부호율이 매우 높다 (일반적으로 비이진 Reed-Solomon 부호).

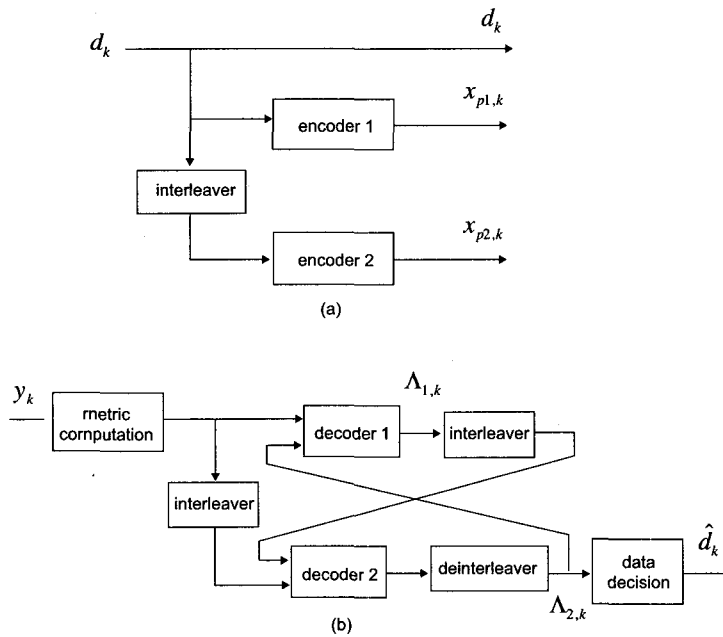
연속적인 부호는 우주공간 통신과 같은 높은 부호화 이득을 필요로 하는 시스템에 적절하다. 연속적인 부호의 대안으로써 두개의 콘볼루션 부호를 연결한 것이 제안되었다. 내측의 Viterbi 복호기가 연판정 출력 복호화 알고리즘을 이용하여 출력 Viterbi 복호기에 연판정 입력 판정을 공급한다. 두개의 복호기 사이의 인터리버는 내측의 복호기에 의해 만들어진 군집 오류를 랜덤화 하기 위해 사용된다.

(그림 8)은 터보 부호화기와 복호화기를 나타낸다. 인터리

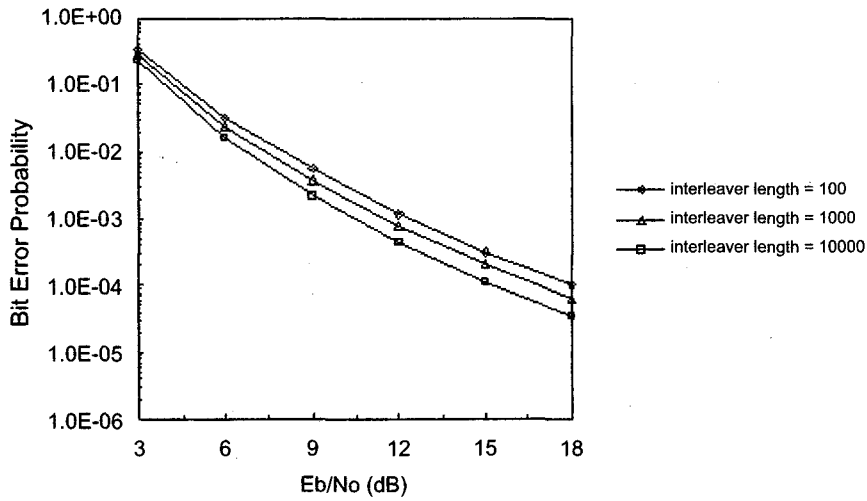
버에 의해 분리되고 병렬로 연결된 두 코드에 의해 만들어진 터보 부호화기를 나타낸다. 정보 비트는 먼저 귀납적인 systematic 콘볼루션 부호화기에 의해 부호화되고 인터리버를 거친 후 두 번째 systematic 콘볼루션 부호화기에 의해 부호화된다. 부호화된 시퀀스는 부호화기에 의해 생성된 페리티 검사 비트와 함께 송신된다. 터보 부호의 복호화 복잡도는 블록의 길이와 복호 반복 회수, 부호의 구속장 길이에 비례한다.

터보 복호화는 복잡도 때문에 최대 근사 (ML : maximum likelihood) 복호화가 아니다. 하지만 반복적 방법을 이용하여 최대 근사 방법과 유사하게 복호화 할 수 있다. 각각의 터보 복호기의 반복에서 다른 복호기의 믿을만한 정보를 이용하여 복호를 수행한다. 터보 복호화에서는 최대 사후 확률 (MAP : maximum a posteriori probability) 알고리즘이 최적으로 알려져 있다. 그러나 SOVA, Max-Log-MAP 알고리즘 등 MAP 알고리즘보다 덜 복잡한 알고리즘이 적합한 알고리즘으로 알려져 있다.

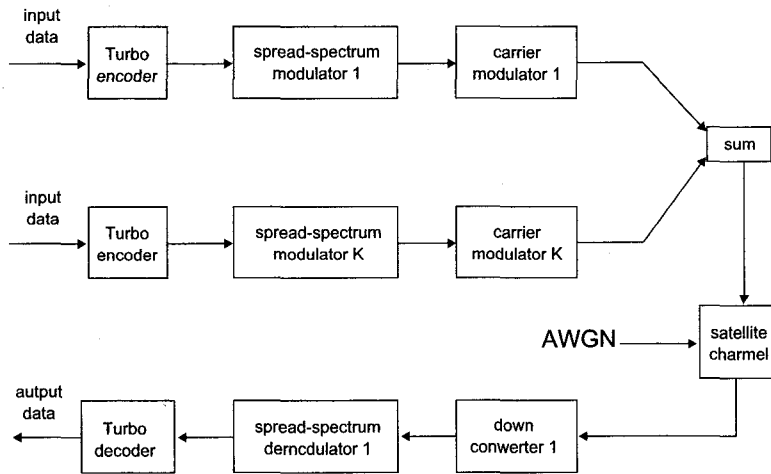
(그림 9)는 터보 부호화기의 인터리버 길이에 따른 비트 오류 확률을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 인터리버의 길이가 늘어남에 따라 비트 오류 성능이 향상됨을 알 수 있다.



(그림 8) (a) 터보 부호화기, (b) 터보 복호화기



(그림 9) 터보 부호화기의 인터리버 길이에 따른 비트오류확률 성능



(그림 10) 위성 채널에서 CDMA 시스템 모델

2. 위성 전송로

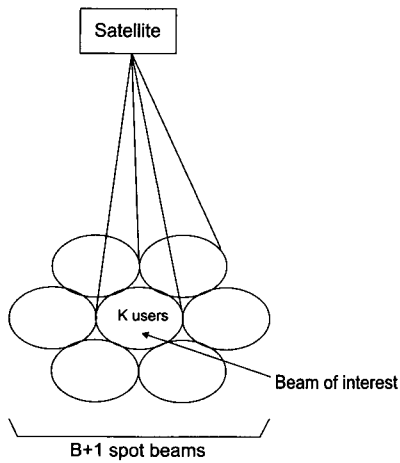
(그림 10)은 위성 전송로 상에서 CDMA 시스템의 송/수신 기 구조를 나타낸다. 각 사용자의 입력 데이터 시퀀스는 터보 부호화 되고 확산 변조된 후 반송파를 변조한다. 반송파 주파수를 가진 K명의 사용자의 신호는 모두 더해져서 송신 된다. 송신된 신호는 위성 채널을 거치고 주파수 하향 변환된 후 수신기에 수신되어 확산 복조된 후 터보 복호화 된다.

(그림 11)은 다중 빔 위성 모델을 나타낸다. 일반적으로 이동 위성은 다중 지점 빔을 사용한다. 이동 위성 다중 지점 빔

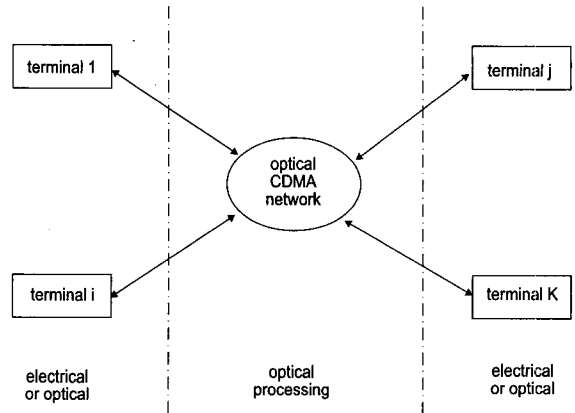
시스템은 개인 통신 네트워크에서 전 세계를 커버하기 위해 이용되거나 잠재적 이동통신 사용자가 매우 많이 분포하는 넓은 지역을 커버하기 위해 사용된다 [2, 19].

(그림 12)는 복호화 알고리즘에 따른 비트 에러 확률을 나타낸다 [20]. 이미 알려져 있는 바와 같이 최적의 MAP 알고리즘은 다른 두 알고리즘에 비해 더 나은 성능을 나타낸다. 그 중 Max-Log-MAP 알고리즘과 MAP 알고리즘 사이에는 약간의 성능차이를 보인다.

따라서 복잡도와 성능을 모두 고려한다면 MAP 알고리즘



(그림 11) 다중 빔 위성 모델



(그림 13) 광 네트워크 구조

보다 max-Log-MAP 알고리즘을 선택하는 것이 더 효과적이라고 말할 수 있다.

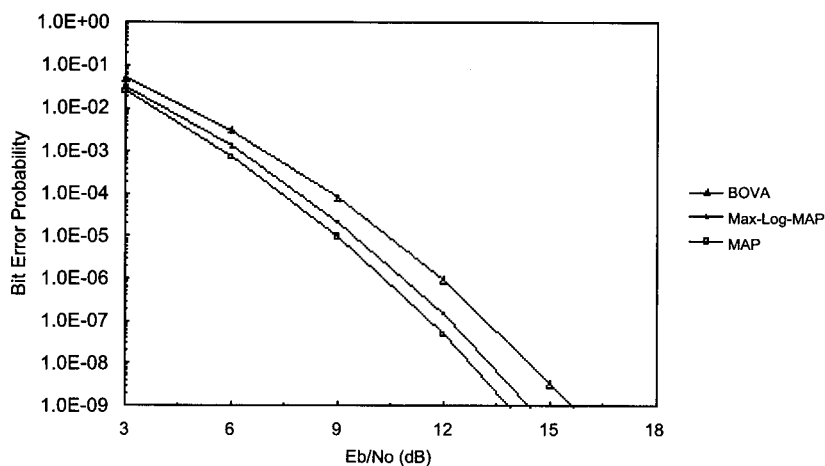
3. 광 전송로

(그림 13)은 K개의 터미널을 가지고 있는 광 네트워크상의 구조를 나타낸다. 이 네트워크는 물리적으로 star topology를 가진 전형적인 수동 광 네트워크이고, 논리적으로 broadcast-and select 네트워크이다.

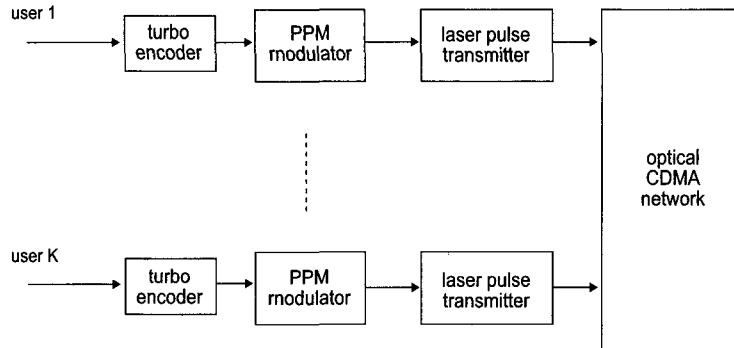
(그림 14) 및 (그림 15)는 각각 송·수신기 구조를 나타낸

다. 각 사용자의 정보 스트림은 터보 부호화기에 입력되고, 터보 부호화된 비트 스트림은 BPPM 변조기에서 변조된다. 수신된 신호는 광 상관기에서 처리된 후 광 검파기에서 전기신호로 바뀐다. BPPM 복조기에서 두 슬롯의 가장 높은 출력이 선택된 후 터보 복호화기를 통하여 전송된 데이터를 추정하게 된다.

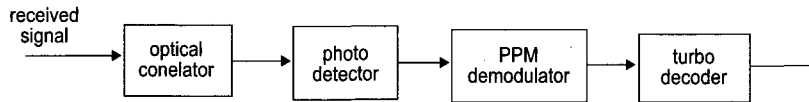
(그림 16)은 광 CDMA 네트워크에서 사용자의 수에 따른 비트 에러 확률을 나타낸다 [21]. 그림에서 보는 바와 같이 반복 회수를 증가시키에 따라 주어진 비트 에러 확률에서



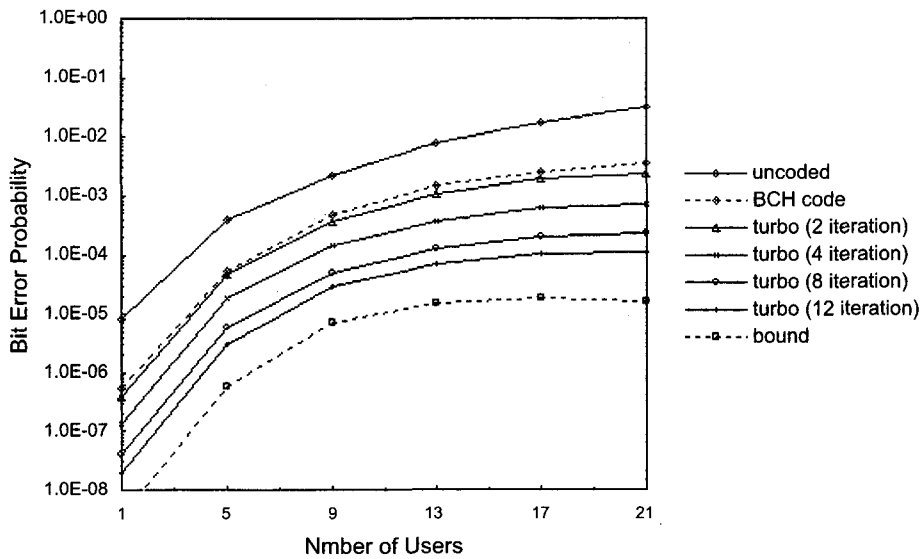
(그림 12) 복호 알고리즘에 따른 비트오류확률 성능



(그림 14) 광 네트워크 송신기



(그림 15) 광 네트워크 수신기



(그림 16) 광 CDMA 네트워크에서 사용자 수에 따른 비트오류확률 성능

동시에 사용할 수 있는 사용자의 수가 증가한다. 그리고 터보 부호화에 의한 성능 향상은 사용자 수가 증가함에 따라 더욱 뚜렷해지는데, 이는 전형적으로 광 CDMA 시스템에서 채널 부호화가 다중 접속 간섭 (MAI : multiple access

interference) 의 영향을 줄이기 위해 적용되기 때문이다.

4. 적외선 전송로

실내 무선 적외선 채널 환경에서 시스템의 신뢰도를 높이

기 위한 방법으로 터보 부호를 사용하는 방법이 있다. 실내 적외선 채널 환경에서는 송·수신기 사이에 장애물이 존재할 수 있기 때문에 LoS (line-of-site) 경로가 항상 존재하는 것은 아니다. 따라서 간접적인 확산링크로써 ceiling bounce 모델을 가정하면 이 모델의 충격응답은 식 5-3과 같다 [14].

$$h_i(t) = \gamma_1 \frac{6a_i^2}{(t+a_i)^7} u(t). \quad (5-3)$$

여기서 γ_1 은 경로손실이고, 1번째 사용자의 지연 확산 D_1 에 대하여 $a_i = 12D_1 \sqrt{11/13}$, $u(t)$ 는 단위 충격응답이다.

적외선 전송로를 통한 무선통신에서, 채널 부호화 하지 않은 경우와 터부 부호를 이용하여 채널 부호화 한 경우의 비트 에러 확률은 각각 식 5-4 및 5-5과 같다.

$$R_{b,u} \leq \frac{1}{2} \frac{M}{M-1} P_{us}. \quad (5-4)$$

$$R_b \leq \sum_{i=0}^N \sum_{d=0}^{2N} \frac{i}{N} A(i,d) R_{b,u}. \quad (5-5)$$

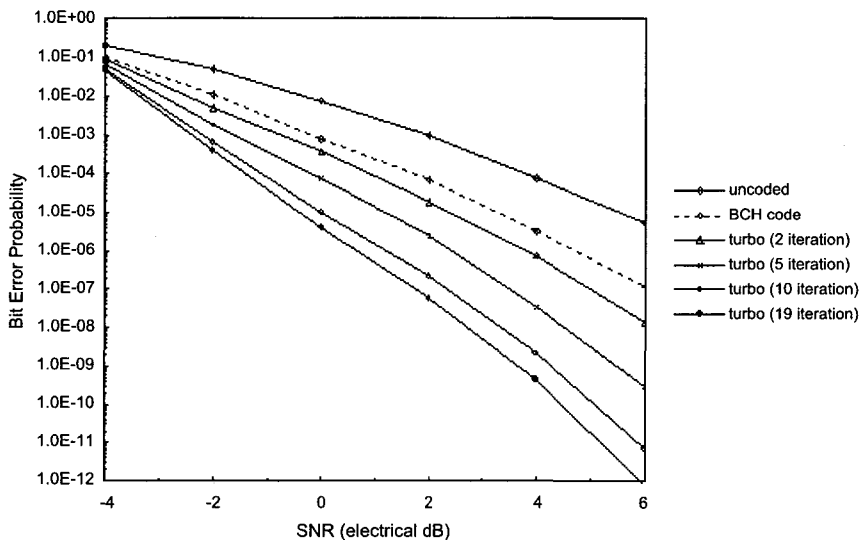
여기서 P_{us} 는 부호화 되지 않은 심볼의 에러 확률이고,

$A(i,d)$ 는 가중치가 i 인 정보 시퀀스와 가중치가 d 인 페리티 비트 스트림에 의해 생성된 코드워드의 수로써 식 5-6과 같이 표현할 수 있다.

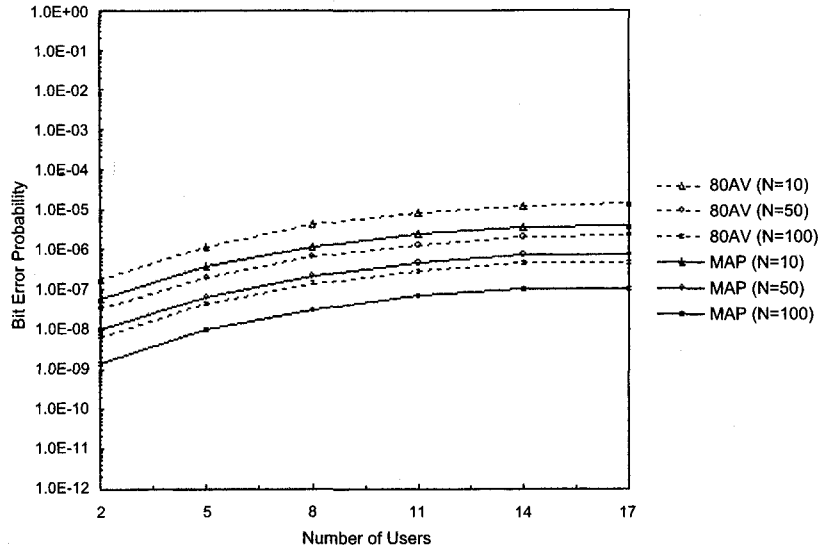
$$A(i,d) = \sum_{d_1=0}^N \sum_{d_2=0}^N P_2(d_1, d_2, li). \quad (5-6)$$

(그림 17)은 여러 반복 회수에 따른 비트 에러 확률을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 반복회수가 어느 정도 (10회) 증가하면 그 이상의 반복은 marginal 부호화 이득만 제공하는데, 이는 충분한 수의 반복 후에는 소프트 정보가 더 이상 유용하지 않기 때문이다. 터보 부호는 소프트 복호화의 경우 (31, 11) BCH 부호보다 향상된 BER 성능을 나타내는데, 이는 터보 복호화에서 반복 회수에 따라 터보 부호와 BCH 부호 사이의 성능 차이가 확연히 나타나는 것을 확인할 수 있다.

(그림 18)은 SOVA 와 MAP 복호화 알고리즘에 따른 비트 에러 확률을 나타낸 것이다. 고정된 부호화율에 대해 인터리버 길이를 증가시키에 따라 점차적으로 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. MAP 와 SOVA 알고리즘 사이의 BER 성능 차이는 SOVA 알고리즘이 시퀀스 에러 확률을 최소화 시키



(그림 17) 반복 회수에 따른 비트 에러 확률 성능



(그림 18) 복호 알고리즘에 따른 비트 오류 확률 성능

는 반면에 MAP 알고리즘은 비트 오류 확률을 최소화 시키는 기본적인 특징 때문이다.

VI. 결 론

무선 이동 통신이 보편화됨에 따라 열악한 무선 채널 환경에서 시스템의 더 나은 성능을 보장하고 고품질의 서비스를 제공하기 위해서는 오류 정정 부호가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 채널 오류를 정정하기 위해 사용되는 오류 정정 부호의 한 종류로서 뛰어난 성능을 나타내는 터보 부호의 원리 및 응용분야에 대하여 알아보았다.

터보 부호화는 두 개의 기본적인 개념으로 이루어져 있다. 하나는 부호가 랜덤한 특징을 나타내도록 부호를 디자인하는 것이고, 다른 하나는 soft-출력 값과 반복적인 복호화를 이용하는 복호화기를 디자인하는 것이다. 터보 부호는 두개의 간단한 연결 부호로 이루어져 있는데, 많은 종류의 연결 방법이 제안되어 있다. 인터리버 역시 부호를 디자인 하는 부분중의 하나이기 때문에 전체 부호에 대한 최대 근사 복호화기는 복잡하다.

하지만 하나 이상의 부호가 사용되기 때문에 반복적인 방

법으로 각 연결 부호에 대해 간단한 SISO (soft-in soft-out) 복호화기를 이용하는 것이 가능하다.

터보 부호가 다른 부호에 비해 오류 정정 성능이 뛰어나기 때문에 현재 대부분의 시스템 표준안에 채택되었다. 하지만 터보 부호화 및 복호화에서 필연적으로 요구되는 시간 지연 문제를 해결하기 위해서는 앞으로도 많은 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 터보 부호에 있는 부호 파라미터 값에 따른 다양한 환경하에서의 성능 분석에 관한 연구도 수행되어야 한다.



- [1] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, and L. A. Weaver, "Increased capacity using CDMA for mobile satellite communication," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 8, pp. 503-514, 1990.
- [2] S. Ohmori, H. Wakana, and S. Kawase, *Mobile Satellite Communications*, Artech house: London, UK, 1998.
- [3] J. G. Proakis, *Digital Communications (2nd edn)*, McGraw-Hill: New York, 1990.

- [4] S. B. Wicker, *Error Control Systems for Digital communication and Storage*, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1995.
- [5] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell Syst. Tech. J.*, pp. 379-423 (pt. I); 623-656 (pt. II), 1948.
- [6] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding: Turbo codes," in Proc. of *IEEE ICC' 93, Geneva, Switzerland*, pp. 1064-1070, June 1993.
- [7] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 1261-1271, 1996.
- [8] S. Benedetto, A. Montorsi, "Unveiling turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 409-482, 1996.
- [9] S. Benedetto and G. Montorsi, "Design of parallel concatenated convolutional codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 591-600, 1996.
- [10] J. Hagenauer and P. Hoher, "a Viterbi algorithm with soft decision outputs and its applications," in Proc. of *IEEE GLOBECOM '89*, Dallas, TX, U.S.A., pp. 1680-1686, Nov. 1989.
- [11] W. J. Blackert, E. K. Hall, and S. G. Wilson, "Turbo code termination and interleaver conditions," *IEEE Electro. Lett.*, vol. 31, no. 24, pp. 2082-2084, Nov. 1995.
- [12] J. Y. Couleaud, "High gain coding schemes for space communications," *ENSICA Final Year Report*, University of South Australia, Sep. 1995.
- [13] S. Benedetto and G. Montorsi, "Iterative decoding of serially concatenated convolutional codes," *IEEE Electro. Lett.*, vol. 32, pp. 1186-1188, June 1996.
- [14] S. Benedetto, G. Montorsi, and D. Divsalar, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes : Performance analysis, design, and iterative decoding," *JPL TDA Progress Report*, pp. 42-126, Aug. 15, 1996.
- [15] P. Gray, "Serially concatenated trellis coded modulation," *PhD Dissertation*, Univ. of South Australia, submitted, Aug. 1998.
- [16] J. Hagenauer and L. Papke, "Decoding turbo codes with the soft-output Viterbi algorithm (SOVA)," in *Proc. of Int. Symposium. Inform. Theory*, Trondheim, Norway, pp. 164, June 1994.
- [17] R. E. Zimmer and R. L. Peterson, *Digital Communications and Spread Spectrum Systems*, New York: Macmillan, 1985.
- [18] B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and Applications* (2nd ed.), Prentice Hall: New Jersey, 2001.
- [19] T. T. Ha, *Digital Satellite Communications* (2nd edn), McGraw-Hill: New York, 1990.
- [20] J. Y. Kim, "Performance of a Turbo-coded CDMA system in a mobile satellite channel," *Int. J. Satell. Commun. Network*, vol. 23, pp. 247-262, 2005.
- [21] J. Y. Kim and H. V. Poor, "Turbo-Coded packet transmission for an optical CDMA network," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 12, Dec. 2000.

약 력



김진영

1998년 서울대학교 공학박사 (이동통신 및 통신이론)
 1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate
 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크연구원 책임연구원
 2001년 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 부교수



허준

2002년 미국 University of Southern California 공학박사 (통신이론 및 이동통신)
 1991년 ~ 1997년 LG전자 중앙연구소 선임연구원
 1997년 ~ 1998년 미국 Stanford University 객원연구원
 2001년 ~ 2002년 미국 Trellisware Inc. Senior Engineer
 2003년 ~ 2007년 건국대학교 정보통신공학부 조교수
 2007년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수