

Rayleigh 페이딩 채널에서 에러 범위 추정에 따른 Turbo Codes의 성능 분석

정회원 장진수*, 전지웅*, 최승배*, 이문호*, 이한섭**, 윤찬의**

Performance Analysis of Turbo Codes by Error Range Search in Rayleigh Fading Channel

Jinsu Chang*, Jiung Jeon*, Seungbae Choi*, Moon Ho Lee*,
Hansup Lee**, Chanui Yun** *Regular Members*

요약

최근 발표된 Turbo codes는 인터리버의 크기가 크고 반복 복호가 충분히 수행되었을 때 BER(Bit Error Rate)의 관점에서 Shannon Limit에 근접하는 우수한 성능을 보였다. 그러나 많은 연산량에 따른 복잡성의 증가, 그리고 인터리버와 반복 복호에 따른 지연과 실시간 처리의 어려움이라는 문제점을 안고 있다. 본 논문에서는 Turbo Codes의 복호 알고리즘으로 사용되고 있는 MAP(Maximum a Posteriori) 알고리즘과 이의 성능을 결정하는 요소를 분석한다. MAP 알고리즘은 모든 인접 비트들과 수신 심볼들 사이의 상태와 전이 확률을 통해 연성 결정 값을 결정하여 반복 복호 동작을 수행한다. 그러므로 MAP 알고리즘의 성능 향상을 위해서는 인접한 수신 심볼들의 신뢰성을 보장해 주어야만 한다. 하지만 MAP 알고리즘 자체에서는 이를 위한 어떠한 동작도 해줄 수가 없기 때문에 추가적인 알고리즘이 필요하다는 간단한 결론을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수신된 심볼에 대하여 좀 더 신뢰성 있는 정보를 MAP 알고리즘의 입력으로 주기 위해 새롭게 에러 범위 추정(Error Range Search) 방식을 제시하며 이를 적용하여 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 성능을 분석하고 Shannon 이론의 관점에서 해석한다.

ABSTRACT

Turbo codes were introduced in 1993 by Berrou, Glavieux, and Thitimajshima. This concept, based on iterative decoding, soft-in/soft-out decoding, parallel concatenation of two recursive systematic convolutional codes and random interleaving, is amazing by its performance. But in spite of the high performance and some applications, there are still remained problems such as increment of complexity by decoding computation, latency by interleaver and iterative decoding. Intuitively, convolutional encoding process and its reverse process (MAP decoding), MAP algorithm depends on the common adjacent bits or received symbols.

I. 서론

데이터의 신뢰도를 높이기 위한 방법으로 사용되는 에러 정정 부호는 디지털 통신 시스템에서 아주 중요한 요소로 자리잡고 있다. 이동 통신 등의 무선 통신 분야에서는 전파 지연 및 다중 전파 경로 수

신에 의한 페이딩 등으로 인하여 채널 잡음이 심하여 많은 전송 에러가 발생하게 된다. 따라서 이동 통신처럼 대역과 전력이 제한된 상황에서는 대역폭이 효율적이면서 에러 정정 능력이 우수한 부호가 요구되고 있다. 1993년 C. Berrou 등에 의해서 제안된 Turbo Codes는 비교적 간단한 구성 부호와

* 전북대학교 정보통신공학과

** 한국통신 연구개발본부 무선통신 연구소(yce92@kt.co.kr)
논문번호 : 98175-0420, 접수일자 : 1998년 4월 20일

큰 인터리버를 가지고 Shannon Limit에 근접하는 우수한 에러 정정 능력을 가지는 것으로 알려지고 있다^[2]. 초기에는 긴 프레임에 따른 복호 지연 등으로 인한 실시간 처리의 어려움으로 우주통신용으로 연구되었으나 최근에는 IMT-2000에서 높은 데이터율 전송의 채널코딩으로 ITU (International Telecommunication Union)에 의해 제안되고 있다^{[14],[15]}. Turbo Codes에서 사용하는 복호 알고리즘은 MAP (Maximum a Posteriori) 알고리즘과 SOVA (Soft-output Viterbi Algorithm)가 사용되고 있다. 일반적으로 MAP 복호기가 SOVA에 비하여 복잡한 구조를 가지고 있지만 성능 면에서는 우수한 것으로 알려져 있다.

1974년 Bahl 등에 의해서 새롭게 인식된 MAP 알고리즘은 이산 무기억 채널을 통하여 전송된 Markov source의 상태와 천이에 대한 APP (A Posteriori Probability)를 계산하여 복호 동작을 수행하는 것이다^[1]. 처음 Berrou 등의 논문에서는 변형된 MAP 알고리즘을 제시하여 Turbo Codes의 복호 동작으로 사용하였으나 복잡한 구조는 크게 개선되지 않았다. 1994년 Pietrobon 등에 의해서 복잡도를 줄이고 하드웨어 구현이 가능한 구조로 MAP 알고리즘을 간단화 한 논문이 제시되었다^[6]. 그러나 여전히 우수한 성능에도 불구하고 많은 연산량으로 인한 복잡도의 증가, 하드웨어 구현상의 어려움 등의 문제점을 안고 있다.

본 논문에서는 MAP 알고리즘의 입력에 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있는 에러 범위 추정(Error Range Search) 방법을 제시하며 이를 이용하여 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 성능을 분석하였다. 먼저 2장에서는 MAP 알고리즘과 Turbo Code의 반복 복호에 대하여 살펴보고 3장에서 제안한 에러 범위 추정 방식의 구조와 동작을 알아본다. 그리고 4장에서 제안한 방법을 적용하여 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 성능을 분석하고 Shannon 이론의 관점에서 살펴보고 마지막으로 5장에서 결론을 맺도록 한다.

II. Turbo Codes의 반복 복호와 MAP 알고리즘 REVIEW

MAP 알고리즘은 이산 무기억 채널을 통하여 전송된 Markov source의 상태와 천이에 대한 APP(A Posteriori Probability)를 얻기 위하여 1974년 Bahl 등에 의해서 제안되었다^[1]. 이러한 MAP 알고리즘

은 격자 복호(trellis decoding)에 대하여 심볼의 에러율을 최소화하는 알고리즘이다. 따라서 전송된 신호 Y 가 수신된 후 복호기의 동작은 수신된 심볼에 대하여 likelihood ratio에 의한 d_k 를 결정하는 것이다.

시간 k 에서 MAP 복호기의 입력이 다음과 같이 BPSK 변조된 수신신호 $R_k^N = (R_1, R_2, \dots, R_N)$ 이라 하자. 여기에서 $R_k = (a_k, b_k)$ 는 시간 k 에서 수신된 심볼을 나타내며 a_k 와 b_k 는 각각 다음과 같다.

$$a_k = (2d_k - 1) + n_k \quad (1)$$

$$b_k = (2p_k - 1) + m_k \quad (2)$$

여기에서 d_k, p_k 는 각각 부호기의 출력값이며 n_k, m_k 는 variance가 σ^2 인 독립적인 가우시안 잡음이다. MAP 알고리즘의 목적은 R_k^N 이 수신된 후 수신된 심볼에 대하여 likelihood ratio를 구하여 정보 비트 d_k 를 결정하는 것이다. 이러한 과정은 다음과 같이 정의되는 LLR(log-likelihood ratio) Λ_k 값에 대응하는 각각의 d_k 를 계산함으로써 얻어질 수 있다.

$$\Lambda_k(d_k) = \log \left(\frac{P_r(d_k=1|R_k^N)}{P_r(d_k=0|R_k^N)} \right) \quad (3)$$

복호된 비트 d_k 의 APP는 결합 확률(Joint Probability)의 형태로 나타나며 다음과 같은 $\lambda_k^i(m)$ 으로 정의한다.

$$\lambda_k^i(m) = P_r(d_k=i, S_k=m|R_k^N) \quad (4)$$

where $i=0, 1, m=0, 1, \dots, 2^v-1$

식 (4)에서 S_k 는 시간 k 에서의 부호기의 상태이며, 이를 이용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_r(d_k=i|R_k^N) &= \sum_{m=0}^{2^v-1} \lambda_k^i(m) \\ &= \sum_{m=0}^{2^v-1} P_r(d_k=i, S_k=m|R_k^N), \quad i=0, 1 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 결과를 이용하여 복호된 비트 d_k 와 관련된 Λ_k 는 다음과 같이 변형된다.

$$\Lambda_k(d_k) = \log \left(\frac{\sum_{m=0}^{2^v-1} \lambda_k^1(m)}{\sum_{m=0}^{2^v-1} \lambda_k^0(m)} \right) \quad (6)$$

여기에서 $\lambda_k^i(m)$ 값을 구하기 위하여 다음과 같은 파라미터들을 정의한다.

$$\alpha_k^i(m) = P_r(d_k = i, S_k = m, R_1^k) \quad (7)$$

$$\beta_k^i(m) = P_r(R_{k+1}^N | d_k = i, S_k = m) \quad (8)$$

위의 두 파라미터 $\alpha_k^i(m)$, $\beta_k^i(m)$ 는 두 값 모두 정보 비트 d_k 값에 의존하게 되며 Bayes' rule을 사용하여 식 (4)의 $\lambda_k^i(m)$ 를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_k^i(m) = \frac{\alpha_k^i(m)\beta_k^i(m)}{P_r(R_1^N)} \quad (9)$$

이를 다시 식 (6)에 적용하면 다음과 같다.

$$\Lambda_k(d_k) = \log \left(\frac{\sum_{m=0}^1 \alpha_k^1(m)\beta_k^1(m)}{\sum_{m=0}^1 \alpha_k^0(m)\beta_k^0(m)} \right) \quad (10)$$

앞에서 언급한 $\alpha_k^i(m)$, $\beta_k^i(m)$ 를 Bayes' rule을 사용하여 다시 정리하면 식 (11), 식 (12)와 같으며 그림 1. 과 그림 2. 는 이들 파라미터에 대한 도식적인 표현을 나타낸 것이다.

◆ $\alpha_k^i(m)$

$\alpha_k^i(m)$ 는 forward state metric이라 하며 이것은 정보 비트 i 의 천이 비트를 가지고 시간 k 와 그 때의 상태 $S_k(m)$ 에서 다음 상태로의 천이를 위한 state metric을 나타낸다.

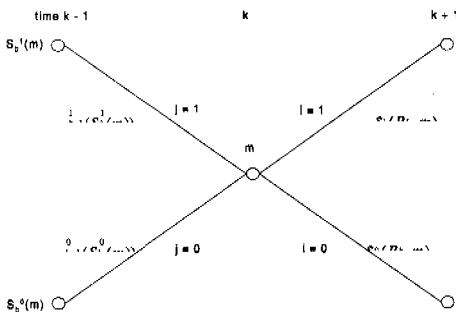


그림 1. $\alpha_k^i(m)$ 에 대한 도식적인 표현

$$\begin{aligned} \alpha_k^i(m) &= P_r(d_k = i, S_k = m, R_1^k) \\ &= \delta_i(R_k, m) \sum_{j=0}^1 \alpha_{k-1}^j(S_j^i(m)) \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 $\delta_i(R_k, m)$ 은 branch metric 값으로 다음과 같으며 $S_j^i(m)$ 은 이전 상태이다.

$$\delta_i(R_k, m) = P_r(R_k | d_k = i, S_k = m) / 2$$

◆ $\beta_k^i(m)$

$\beta_{k,i}(m)$ 의 계산은 $\alpha_k^i(m)$ 의 계산 과정과 유사하게 나타나며, 단지 계산의 진행 과정이 $\alpha_k^i(m)$ 와는 반대인 backward state metrics 형태로 나타난다.

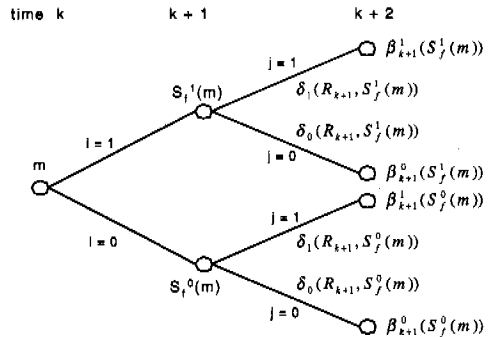


그림 2. $\beta_k^i(m)$ 에 대한 도식적인 표현

$$\begin{aligned} \beta_k^i(m) &= P_r(R_{k+1}^N | d_k = i, S_k = m) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=0}^1 \beta_{k+1}^j(S_j^i(m)) \delta_j(R_{k+1}, S_j^i(m)) \end{aligned} \quad (12)$$

여기에서 $\delta_j(R_{k+1}, m')$ 은 다음과 같으며 $S_j^i(m)$ 은 다음 상태를 나타낸다.

$$\delta_j(R_{k+1}, m') = P_r(R_{k+1} | d_{k+1} = j, S_{k+1} = m') / 2$$

MAP 알고리즘을 Turbo Codes의 반복 복호 알고리즘에 적용하면 다음과 같다. 임의의 시간 k 에서의 입력 심볼에 대한 LLR(Log-Likelihood Ratio)는 위에서 정의한 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 $P_r(d_k = i | R_1^N)$ 는 수신 심볼 R_1^N 에 대한 $d_k = i$ 의 APP(A Posteriori Probability)이며, 복호기는 $\Lambda_k(d_k)$ 에 대한 임계값을 통하여 정보 비트 \hat{d}_k 를 얻어내게 된다.

$$\hat{d}_k = \begin{cases} 1 & \text{if } \Lambda_k(d_k) \geq 0 \\ 0 & \text{if } \Lambda_k(d_k) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

위의 결과 식을 Turbo Codes에 적용하면 출력값 $\Lambda_k(d_k)$ 는 다음과 같은 표현으로 나타낼 수 있다.

$$\Lambda_k(d_k) = \Lambda_{systematic} + \Lambda_{apriori} + \Lambda_{extrinsic} \quad (14)$$

식 (14)에서 $\Lambda_{systematic}$ 는 시간 k 에서 수신된 systematic 심볼에 대한 것만을 나타내며 $\Lambda_{apriori}$ 는 입력 비트 d_k 에 대한 APP (*a priori information*) 이다. 그리고 $\Lambda_{extrinsic}$ 은 입력 비트 d_k 와 관계하여 나타나는 새로운 정보인 외부 정보(*extrinsic information*)를 나타내며 시간 k 에서 systematic 데이터를 제외한 모든 데이터와 패리티 비트들에 대한 정보를 가지고 있게 된다.

이러한 $\Lambda_{extrinsic}$ 정보들을 이용하여 Turbo Codes에서는 반복 복호 동작을 수행하게 되며 그림 3과 같다.

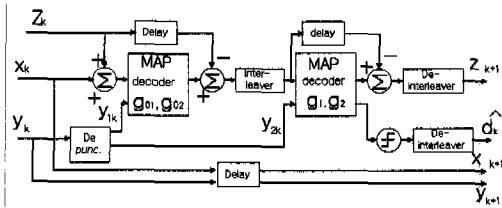


그림 3. Turbo Codes의 반복 복호

앞에서 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 복호 계산 과정을 기술하였는데, 이것을 토대로 알고리즘과 계산의 진행 중에 나타나는 값들의 연관성을 살펴보도록 하자. 직관적으로 볼 때, Convolutional 부호화 과정과 이의 역 과정인 MAP 알고리즘은 공통적으로 인접한 비트 혹은 수신된 심벌에 의존한다.

좀 더 자세히 설명하면 MAP 알고리즘의 성능 향상을 위해서는 인접한 수신 심벌들의 신뢰성을 보장해 주어야만 한다는 것이다. 하지만 MAP 알고리즘 자체에서는 이를 위한 어떠한 동작도 해줄 수가 없기 때문에 추가적인 알고리즘이 필요하다는 간단한 결론을 얻을 수 있다. 이 때 추가적인 알고리즘의 동작은 *hard decoding*의 관점을 가질 필요가 있다.

왜냐하면 수신 심벌의 신뢰성을 보장해 줄 수 있는 알고리즘이라는 것은 옳은 값과 틀린 값을 명확히 구분해 줄 수 있어야 하기 때문이다. 또한 알고리즘이 요구하는 최종값은 *hard decoding*을 통하여 얻어지며, *soft decoding*의 관점에서는 *soft값*의 최대값이 알고리즘이 최종적으로 얻고자 하는 *hard값*과 일치한다.

III. 제안한 에러범위추정 방식

본 논문에서는 앞에서 언급한 MAP 알고리즘의 성능 향상을 위해 추가적인 알고리즘인 에러 범위 추정 방식을 제안한다. 그림 4는 에러 범위 추정 방식을 적용한 Turbo Codes의 블록도를 나타낸 것이다. 일반적으로 채널을 통과한 데이터는 변조된 신호에 잡음이 섞여서 들어오기 때문에 원래의 데이터를 알아보기 어렵게 된다. 지금까지의 복호 방법은 이러한 신호를 그대로 복호기에 입력하여 복호 동작을 수행하였다. 그러나 에러가 발생한 범위를 추정하여 MAP 복호기에 좀 더 깨끗한(잡음이 제거된) 데이터를 입력으로 주게 된다면 어느 정도의 성능 향상을 기대할 수 있을 것이다. 즉, 에러가 발생한 것으로 추정된 범위에는 채널을 통과한 데이터를, 나머지 데이터에 대해서는 잡음이 제거된 값(즉, *soft 데이터*의 최대값)을 복호기의 입력으로 사용하는 것이다.

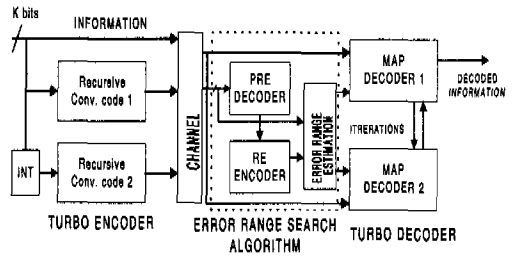


그림 4. 에러 범위 추정 알고리즘에 의한 Turbo Codes의 전체 블록도

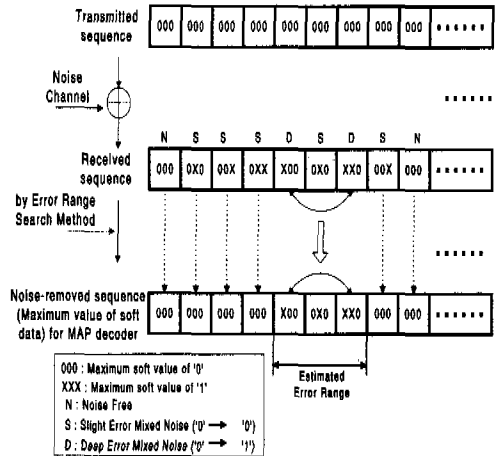


그림 5. 제안한 에러 범위 추정 방식의 동작그림

그림 4와 그림 5에서 보인 에러 범위 추정을 위한 방법에는 부호기의 역 행렬 특성을 이용하여 원래 데이터를 복호하며 구조 또한 매우 간단하여 다른 부호와 연결하였을 때 아주 우수한 성능을 보이고 있는 알고리즘이 제시되고 있다^{[4],[5]}. 그림 5는 에러 범위 추정 방식의 동작을 나타낸 블록도이다.

IV. 에러 범위 추정 방식에 따른 성능 분석

이 장에서는 에러 범위 추정 방식을 적용하여 AWGN과 flat fading 채널에서 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 성능 분석한 결과를 보인다.

1. 채널 모델링

그림 6은 모의 실험을 위한 시스템 모델을 보이고 있다. 모의 실험을 위하여 사용된 Turbo Codes의 구조장은 3, 5이고 모의 실험을 위한 프레임의 크기는 192, 1056이다. 그리고 사용된 인터리버의 크기는 프레임의 크기와 같도록 하였다. AWGN 채널의 경우 페이딩 진폭 $a_k = 1$ 이며 페이딩 채널의 경우 ISI가 없는 flat fading 환경을 고려하였다. 즉 이상적인 채널 인터리빙이 이루어진 것을 가정하였으며 따라서 페이딩 진폭은 심볼에 대하여 독립적으로 영향을 주며 Rayleigh 분포를 가지게 된다.

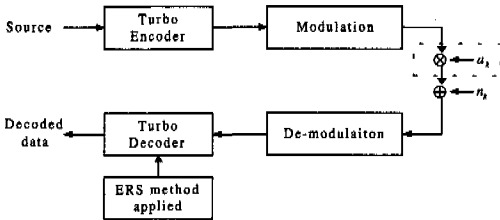


그림 6. 모의 실험을 위한 시스템 모델

2. AWGN 채널에서 에러 범위 추정에 따른 MAP 알고리즘의 성능

이 절에서는 먼저 MAP 복호기에 입력되는 데이터에 대하여 에러 범위 추정 (ERS)의 신뢰도에 따른 성능을 제시한다.

그림 7과 그림 8은 각각 구조장의 크기가 3 ($K = 3$)과 5 ($K = 5$), 부호율(R) = 1/2 그리고 프레임의 크기를 192로 하여 AWGN 채널에서 MAP 복호기의 에러 범위 추정 신뢰도에 따른 성능을 비교한 것이다.

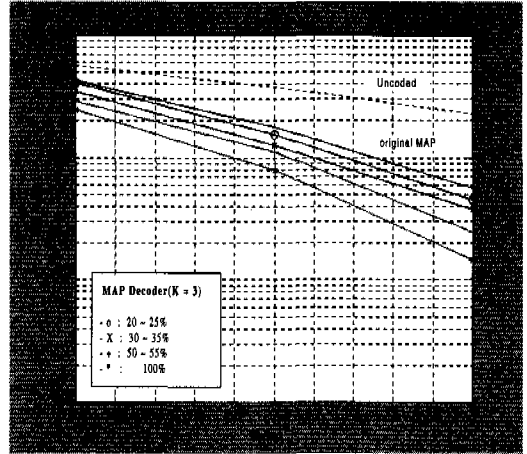


그림 7. ERS/MAP 알고리즘의 성능($K = 3$, 프레임=192 bit)

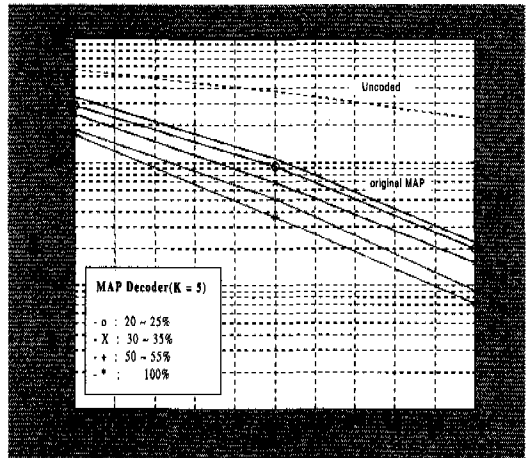


그림 8. ERS/MAP 알고리즘의 성능($K = 5$, 프레임=192 bit)

그림 7과 그림 8에서 보면 신뢰도를 높여갈수록 MAP 알고리즘의 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 신뢰도라는 것은 추정된 범위 안에 에러가 나타나게 될 확률을 나타내게 된다. 따라서 신뢰도를 높인다는 의미는 에러 범위의 추정이 정확해진다는 것을 의미하며 결국 신뢰도를 조금만 높여도 기존의 MAP 알고리즘에 비하여 성능의 향상을 가져오는 것을 알 수 있다. 그림 7에서 보면 ERS/MAP 알고리즘의 성능이 기존의 MAP 복호기의 성능에 비하여 신뢰도를 50 ~ 55%로 추정하였을 때 $BER = 10^{-2}$ 에서 0.4dB 이상의 이득을 얻고 있으며 낮은 BER쪽을 갈수록 이득은 점점 더 커지는 것을 알 수 있다. 그림 8은 구조장이 5인 경우인데 역시

기존의 MAP 복호기에 비하여 BER = 10^{-3} (신뢰도 = 50 ~ 55%)에서 약 0.5dB 이상의 이득을 얻고 있는 것을 알 수 있다.

3. ERS/MAP 알고리즘 및 Shannon 이론의 관점

앞에서 ERS/MAP 알고리즘의 성능 분석에서 고려해 봐야 할 것은 에러 추정 신뢰도 100%에 관한 부분이다. 에러 추정 신뢰도를 100%로 수행할 수 있다는 것은 블록 부호의 관점에서 보면 모든 에러를 수정할 수 있다는 것을 의미하지만 MAP 알고리즘의 관점에서 보면 그림 7과 그림 8에서 보듯이 더 이상 수정할 수 없는 알고리즘의 한계점일 것이다. 이것은 soft 데이터를 다루기 때문에 나타나는 현상인데, 결국 인접 비트들의 correlation을 이용하여 복호를 수행하였을 때, 에러가 발생한 비트들에 대하여 빠른 반전, 즉 $-1 \rightarrow 1$ 혹은 $1 \rightarrow -1$,을 기대할 수 없게 된다. 따라서 MAP 알고리즘의 성능 향상을 위해서 부호화 할 때 고려해야 될 것들을 Shannon 이론의 관점에서 다음의 세가지로 요약할 수 있다.

- Redundancy 추가
- Constraint length 증가
- Correlation

먼저, Redundancy의 추가는 낮은 부호율을 의미하는데, 응용 분야에 따라 다른 입장을 보이겠지만 부호 이론의 관점에서는 작은 정보 데이터의 전송과 복호기의 복잡도 증가를 의미하므로 좋은 방법이라 볼 수 없을 것이다.

두 번째로 언급할 문제는 구속장(Constraint length)을 증가시키는 문제이다. 이론상으로는 구속장을 증가시키면 성능 또한 증가하겠지만, 결국은 Shannon limit에는 도달하지 못한다. 왜냐하면 부호화한 비트들의 correlation이 증가할수록 부호화 동작을 위한 많은 정보를 얻을 수는 있겠지만 에러들에 대한 correlation 또한 증가하기 때문이다. 여기에서 에러들에 대한 정보를 얻을 수만 있다면 부호화를 위해 크게 기여하겠지만 거의 알 수가 없기 때문에, 일반적으로 정보들 사이의 correlation을 유지시키고 에러들 사이의 correlation을 제거하기 위해 인터리버를 사용하지만 인터리버 크기에 따라 correlation을 어느 정도 제거해 줄 것인지도 어려운 문제이며 복잡성이나 지연의 문제도 수반하게 된다.

마지막으로 인접 비트들의 correlation을 살펴보도록 하자. 이것은 두 번째에서 언급한 것과도 관계가 되지만 엄격한 차이를 두면 다음과 같다. 구속장(K)의 증가는 인접 비트들의 correlation을 증가시키는 하지만 복잡성이 높아진다. 여기에서 언급하고자 하는 인접 비트들의 correlation은 복잡성의 증가를 초래하지 않는 범위 내에서의이다. 즉, 인접 비트들이 좋은 soft값을 가질수록 서로에 대한 영향을 크게 주기 때문에 성능의 향상을 기대할 수 있다는 것이다. 하지만, 이미 앞에서 언급한 것처럼 인접 비트들의 soft 값을 최대로 향상시켜도 그리고 에러들에 대한 correlation을 제거한다고 해도, 본질적인 문제인 에러에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 Shannon limit에 도달하지는 못할 것이다.

4. AWGN 채널에서 에러 범위 추정(ERS)에 따른 Turbo Codes 성능 분석

이 절에서는 ERS/Turbo Codes 알고리즘을 부호율 1/3, 구속장 3과 5, 그리고 프레임의 크기를 192와 1056으로 가변 하여 AWGN 채널에서 분석하였으며 블록 인터리버를 사용하였다.

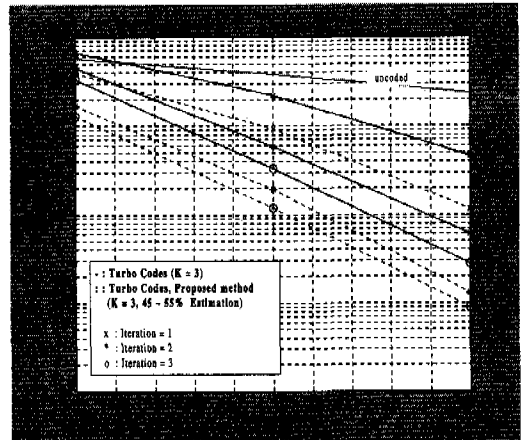


그림 9. ERS/Turbo Codes의 성능 분석(K = 3, 프레임 = 192bit)

그림 9와 그림 10은 에러 범위 추정 방법을 적용한 Turbo Codes의 성능을 구속장의 크기(K = 3, 5)에 따라 보이고 있다. 모의 실험에 사용된 프레임의 크기는 192비트이며 에러 범위 추정의 신뢰도는 약 45 ~ 55%정도이다. 그림 9에서 제안한 방법을 적용하여 Iteration을 2번한 Turbo Codes의 성능이 기존의 Turbo Codes의 Iteration을 3번하였을 때보다 10^{-3} 에서 약 0.2dB 이상의 이득을 얻는 것을

알 수 있다.

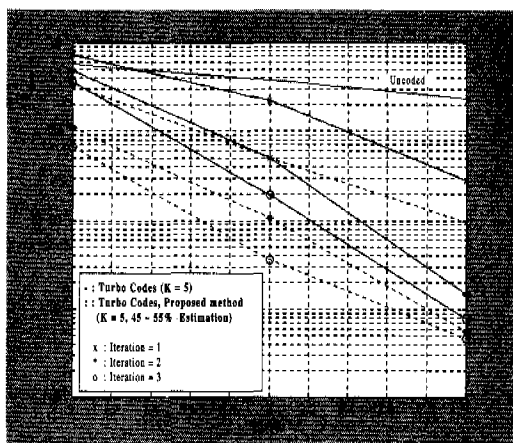


그림 10. ERS/Turbo Codes의 성능(K = 5, 프레임 =192bits)

그림 10에서도 역시 제안한 방법을 적용한 Turbo Codes의 성능이 기존의 Turbo Codes의 성능보다 각각 우수한 것으로 나타나고 있다. 특히 Iteration을 크기가 Iteration을 3번씩 동일하게 하였을 때 제안한 방법을 적용한 Turbo Codes의 성능이 기존의 Turbo Codes에 비하여 10^{-3} 에서 약 0.6dB 이상의 성능 향상을 가져오는 것을 알 수 있다.

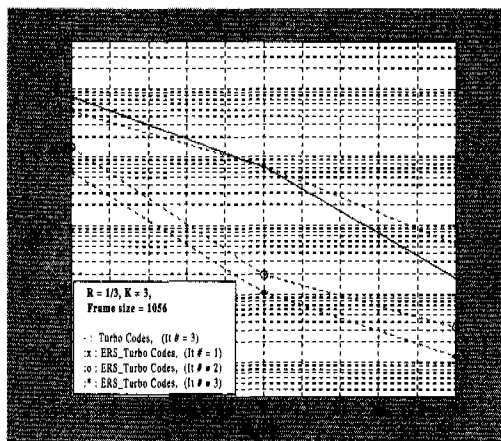


그림 11 ERS/Turbo Codes의 성능(K=3, 프레임=1056)

그림 11은 구속장(K)=3 그리고 프레임의 크기를 1056으로 하였을 때의 성능을 보이고 있다. 인터리버의 크기는 32 X 33이다. 그림 11에서도 알 수 있듯이 기존의 반복 복호를 3번 수행한 Turbo Codes에 비하여 제안한 ERS/Turbo Codes가 2번의

반복 복호만으로 BER = 10^{-4} 에서 0.9dB 정도의 이득을 얻고 있는 것을 알 수 있다. 특히 2dB 이하의 낮은 전력에서는 제안한 알고리즘의 성능이 한 번의 반복 복호만으로 기존의 3번 반복 복호를 수행한 Turbo Codes와 비슷한 것으로 나타나고 있다. 이처럼 프레임의 크기가 커지게 되면 인터리버로 인하여 Turbo Codes의 성능 향상이 커지게 되며 결국 제안한 ERS/Turbo Codes의 성능 역시 기존의 Turbo Codes 성능보다 월등히 좋을 것으로 기대된다.

5. Rayleigh 페이딩 채널에서 여러 범위 추정(ERS)에 따른 Turbo Codes 성능 분석
이 절에서는 flat fading 환경(즉 그림 6에서 a_k 의 값이 심볼마다 독립적으로 영향을 주게 됨)에서의 ERS/Turbo decoder의 성능을 기존의 Turbo Codes의 성능과 비교 분석한 내용을 보이고 있다.

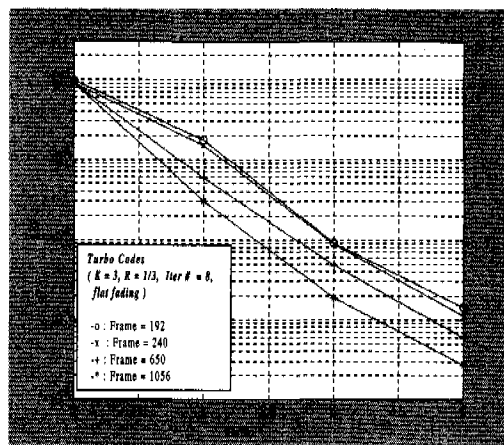


그림 12. flat fading 채널에서 프레임의 크기에 따른 Turbo Codes의 성능(K = 3, R = 1/3, 반복 복호 = 8회)

그림 12는 Iteration을 8번으로 동일하게 하였을 때 flat fading 채널에서 프레임의 크기에 따른 Turbo Codes의 성능을 보이고 있으며 프레임의 크기가 커질수록 성능의 향상이 있다는 것을 알 수 있다. 그림 13은 flat fading 채널에서 ERS/Turbo decoder의 성능을 보이고 있다. 그림 13에서 보면 반복 복호를 8회 수행한 기존의 Turbo Codes에 비하여 ERS 방법을 적용하여 반복 복호를 3회 수행한 Turbo Codes의 성능이 BER = 10^{-3} 에서 약 0.4dB 이상의 이득을 얻고 있는 것으로 나타나고 있다. 특히 반복 복호를 2회 수행한 ERS/Turbo

decoder의 성능 역시 BER = 10^{-3} 에서 약 0.2dB 정도의 성능 이득을 얻고 있다.

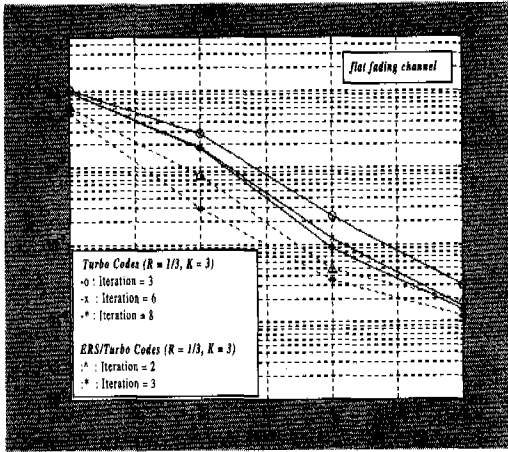


그림 13. flat fading 채널에서 ERS/Turbo decoder의 반복 복호에 따른 성능(K = 3, R = 1/3)

V. 결론

Convolutional 부호화 과정과 이의 역 과정인 MAP 알고리즘은 공통적으로 인접한 비트 혹은 수신된 심볼에 의존한다. 즉, MAP 알고리즘의 성능 향상을 위해서는 인접한 수신 심볼들의 신뢰성을 보장해 주어야만 한다는 것이다. 하지만 MAP 알고리즘 자체에서는 이를 위한 어떠한 동작도 해줄 수가 없기 때문에 추가적인 알고리즘이 필요하다는 간단한 결론을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수신된 심볼에 대하여 좀 더 신뢰성 있는 정보를 MAP 알고리즘의 입력으로 주기 위해 새롭게 여러 범위 추정 방식을 제안하였다.

여러 범위 추정에 따른 MAP 복호기와 Turbo Codes의 성능을 분석하기 위해 먼저 MAP 알고리즘과 Turbo Codes의 수식적인 전개 과정을 알아보고 있다. 그리고 제안한 여러 범위 추정에 따른 성능을 구속장 3, 5인 MAP 복호기와 Turbo Codes를 통하여 분석하였다. 모의 실험 결과 기존의 MAP 복호기에 비하여 여러의 범위를 추정하여 복호 동작을 수행하였을 때 10^{-3} 의 BER에서 K = 3 이나 K = 5, 그리고 약 50%의 추정을 통하여 약 0.5dB 이상의 성능 향상을 기대할 수 있었으며, 또한 작은 프레임 크기 (192 bit)를 가지며 반복 복호 회수를 3 번씩 동일하게 하였을 때 제안한 방법을 적용한 Turbo Codes의 성능이 기존의 Turbo Codes에 비

하여 10^{-3} 에서 약 0.6 dB 이상의 성능 향상을 가져오는 것을 알 수 있었으며, 큰 프레임의 크기 (1056 bit)에서도 성능은 기존의 반복 복호를 3번 수행한 Turbo Codes에 비하여 제안한 ERS/Turbo Codes가 2번의 반복 복호 만으로 BER = 10^{-4} 에서 0.9 dB 정도의 이득을 얻고 있는 것을 알 수 있다. 이처럼 프레임의 크기가 커지게 되면 인터리버로 인하여 Turbo Codes의 성능 향상이 커지게 되며 결국 제안한 ERS/Turbo Codes의 성능 역시 기존의 Turbo Codes 성능보다 월등히 좋을 것으로 기대된다. 또한 flat fading 채널에서 반복 복호를 8 회 수행한 기존의 Turbo Codes에 비하여 ERS 방법을 적용하여 반복 복호를 3회 수행한 Turbo Codes의 성능이 BER = 10^{-3} 에서 약 0.4dB 이상의 이득을 얻고 있는 것으로 나타나고 있다. 특히 반복 복호를 2회 수행한 ERS/Turbo decoder의 성능 역시 BER = 10^{-3} 에서 약 0.2dB 정도의 성능 이득을 얻고 있다.

결국 비교적 간단한 구조를 가지고 여러의 범위를 추정하여 Turbo Codes에 적용하면 큰 복잡도의 증가 없이 MAP 복호기를 사용하는 Turbo Codes의 성능을 향상시킬 수 있을 것이며 또한 Turbo Codes가 안고 있는 문제점의 하나인 반복 복호로 인한 지연의 문제나 인터리버의 크기를 줄일 수 있을 것이다.

참고 문헌

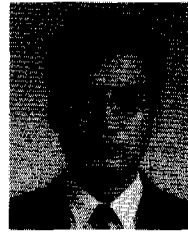
- [1] L.Bahl, J. Cocke, F.jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-20, pp. 284-287, Mar. 1974
- [2] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima. "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding : Turbo Codes," in ICC, pp. 1064-1070, 1993.
- [3] P. Jung, M. M. Naβ han, " Performance Evaluation of Turbo-Codes for Short Frame Transmission Systems," Electronics Letters, vol, 30, No. 2,pp. 111-113, Jan. 1994
- [4] Jinsu Chang, Seungbae. Choi, Juyong Park, Moon Ho Lee, "A Syndrome Check Error Estimation Algorithm for Convolutional Coding," The 2nd Inter.workshop. on.

Multi-Dimentional Mobile Communication. pp 556-560, July 18-20, 1996.(MDMC'96)

- [5] Jinsu Chang, Seungbae Choi, Moon Ho Lee, "A Low-Complexity SCEE Algorithm for Convolutional Codes and Its Concatenated Coding for Wireless Communication" *IEEE ICUPC'97 Oct 12-16, 1997(Sandiego)*.
- [6] Steven S. Pietrobon, Adrian S. Barbulescu, "A Simplification of the Modified Bahl Decoding Algorithm for Systematic Convolutional codes", *Proceedings of ISITA'94*, pp.875-880, Sydney, Australia, November 1994
- [7] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Soft-output decoding algorithms for continuous decoding of parallel concatenated convolutional codes," in *Proc., IEEE Int. Conf. on Comm.*, pp. 112-7, May 1996.
- [8] J. Hagenauer and P. Hoehner, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications," in *Proc., IEEE GLOBECOM*, pp. 1680-6, 1989.
- [9] D. Divsalar and F. Pollara, "Turbo Codes for PCS Applications", in *ICC*, June, 1995
- [10] S. Benedetto, and G. Montorsi, "Design of Parallel Concatenated Convolutional Codes," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 44, No. 5, pp. 591-600, May 1996.
- [11] Havish Koorapaty, Yi-Pin Eric Wang, and Kumar Balachandran, "*Performance of Turbo Codes with Short Frame Sizes*", *VTC'97*
- [12] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons. Inc. 1992.
- [13] 이문호, 최승배, "터보코드의 이론과 구조 및 성능", *전자공학회지* vol. 23. no 10, 1996
- [14] 이문호, "IMT-2000을 위한 채널 코딩 기술", *한국 통신 학회지*, 정보통신, 제14권 제8호, 1997
- [15] 이문호, "Channel Coding of IMT-2000", 제 1 회 IMT-2000 워크샵, 1997.8. 21. ~ 22. 서울 교육 문화회관

장진수(Jinsu Chang)

정회원

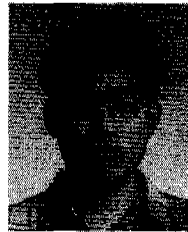


1996년 2월 : 전북대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
 1998년 2월 : 전북대학교 정보통신공학과 석사(공학 석사)
 1998년 3월~현재 : 전북대학교 컴퓨터공학과(정보통신전공) (박사 과정)

<주관심 분야> 디지털 이동통신, 채널코딩

전지웅(Jiung Jeon)

정회원



1997년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 정보통신공학과(석사 과정)
 <주관심 분야> 디지털 이동통신, 채널 코딩

최승배(Seungbai Choi)

정회원

1993년 2월 : 전북대학교 정보통신공학과(공학사)
 1996년 2월 : 전북대학교 정보통신공학과(공학 석사)
 1996년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 컴퓨터공학과(박사 과정)
 <주관심 분야> 채널코딩, 디지털 이동통신

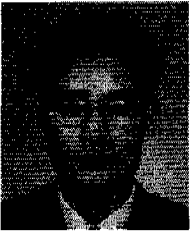
이문호(Moon Ho Lee)

정회원

1970년~1980년 : 남양문화방송(주) 송신소장
 1990. 8 : 일본 동경대 전자과(박사·통신기술사)
 1985년 8월~1986년 8월 : 미국 미네소타주립대 전기과 포스터닥터
 1995년 12월, 1996년 12월, 1998년 6월 : 독일 하노버 아혼공대 전기과 및 뮌헨 공대 연구교수
 1997년~현재 : 디지털 지상파방송 추진위원 및 정보통신 정책심의 위원
 현재 전북대 정보통신공학과 교수
 <주관심 분야> 디지털 이동통신 및 채널 코딩, 디지털 영상신호 처리, 무선 ATM

이 한 섭(Han-Sup Lee)

정회원



1988년 2월 : 동아대학교 전자
공학과 졸업(공학사)

1991년 2월 : 연세대학교 대학
원 전자공학과 졸업(공학석사)

1995년 8월 : 연세대학교 대학
원 전자공학과 졸업(공학박사)

1995년 9월- 1996년 8월 : 연세
대학교 전자정보통신 연구소 선임 연구원

1996년 9월~현재 : 한국통신연구개발본부 선임연구
원

<주관심 분야> 대역확산통신, 디지털통신, 이동통신,
IMT-2000 물리계층설계

e-mail : hansup@kt.co.kr

윤 찬 의(Chan-Eui Yun)

정회원



1983년 2월 : 인하대 전자공학
과 졸업(공학사)

1985년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 졸업(공학
석사)

1995년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 졸업(공학
박사)

1985년~현재 : 한국통신연구개발본부 선임연구원

<주관심 분야> RF, 안테나, 이동통신, IMT-2000

e-mail : yce92@kt.co.kr