

터보부호의 복호지연 감소를 위한 새로운 반복중단 알고리즘

심 병 섭, 이 완 범, 정 대 호, 임 순 자, 김 태 형*, 김 환 용
원광대학교, 익산대학*
전화 : 063-850-6740 / 팩스 : 063-857-3999

New Stop Criterion for Reduce of Decoding Delay of Turbo Codes

B. S. Shim, W. B. Lee, D. H. Jeong, S. J. Lim, T. H. Kim*, H. Y. Kim
Wonkwang University, Iksan National College*
E-mail : shim@wonkwang.ac.kr

Abstract

Turbo codes, proposed by Berrou, that increase the interleaver size and the number of iteration have better than conventional convolutional codes, in case of BER performance.

However, because turbo codes has been required much decoding delay to increase iteration number, it demands unnecessary iterative decoding.

Therefore, in this paper, we propose iterative decoding stop criterion that uses the variance of absolute value of LLR. This algorithm can be reduced average iterative decoding number and had lossless performance of BER, because of decreasing unnecessary iterative decoding.

I. 서 론

차세대 디지털 이동통신 시스템은 고속 데이터의 신뢰성 있는 전송을 위하여 채널에서 발생하는 오류를 줄이는 오류정정 부호(error correction code)의 적용이 필요하다. 오류정정 기법은 인위적 또는 자연적으로 발생하는 잡음과 송신단의 전송전력 제약등 주어진 환경에서 고품질의 통신을 달성하기 위해 사용된다.

특히, 고속의 데이터 전송이 요구되는 이동통신 시스템에서 비트오류를 정정하기 위한 채널 코드 방식의 선택은 매우 중요한 위치를 차지한다.

Berrou 등에 의해서 제안된 터보부호는 큰 인터리버와 반복복호 기법을 사용하여 비트 에러율 관점에서 사는 한계에 근접하는 아주 우수한 오류정정 능력을 가지는 것으로 알려져 있다^[1].

터보부호의 복호기는 복호 알고리즘에 따라서 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm)방식의 복호기와 MAP(Maximum A Posteriori)방식의 복호기로 분류된다. 이 복호기들은 연판정(soft-decision)값을 출력하는 SISO(Soft-Input Soft-Output) 방식을 사용하며 터보부호의 구조상 2개의 복호기로 구성된다^[2]. 각 복호기가 생성하는 연판정값을 다른 복호기에 넘겨주어 반복복호를 수행한다. 일반적으로 반복복호 횟수가 증가할수록 BER 성능은 좋아진다. 그러나 고정된 반복복호 횟수를 고려할 경우 다양한 채널환경에서 SNR이 증가할 때 반복복호 1회당 얻을 수 있는 BER 성능개선의 정도는 감소하게되어 무의미한 반복이 이루어져서 복호지연이 증가하게 된다.

본 논문에서는 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 줄이고 의미없는 반복복호에 의한 복호지연을 감소시키기 위한 새로운 반복중단 알고리즘을 제안한다.

II. 반복중단 알고리즘

그림 1은 터보복호기의 구조로서 직렬로 연결된 2개의 MAP 복호기와 인터리버, 디인터리버로 구성된다.

터보부호의 복호과정에서 복호기 출력값은 Log Likelihood Ratio(LLR)로 표현되며 수신 신호열을 R_1^N 이라 할 때 정보비트 d_k 에 대한 LLR 출력값은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

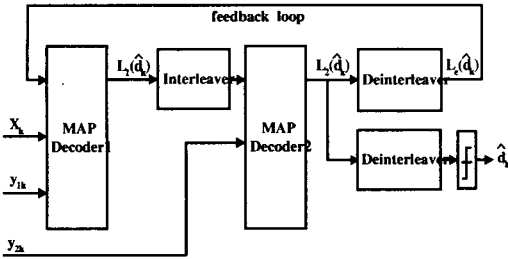


그림 1. 터보복호기의 구조

$$L(\hat{a}_k | R_1^N) = \log \frac{P(\hat{a}_k = 1 | R_1^N)}{P(\hat{a}_k = 0 | R_1^N)} \quad (1)$$

여기서 N 은 인터리버의 크기를 나타낸다. 식 (1)에서 LLR 출력값은 수신 신호열이 R_1^N 일 때 정보비트 d_k 가 "1"일 확률과 "0"일 확률의 비에 Log를 취한 값을 알 수가 있다. 이러한 LLR 출력값은 식 (2)와 같이 세 가지 항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$L(\hat{a}_k | R_1^N) = L_a(d_k) + L_c y_k + L_e(\hat{a}_k) \quad (2)$$

여기서 $L_a(d_k)$ 는 정보비트 d_k 에 대한 사전정보(a priori information)값이고 두 번째 항은 수신된 systematic 정보에 대한 값이다. 여기서 L_c 는 채널의 신뢰도로서 가우시안 채널에서는 $2/\sigma^2$ 의 값을 갖는다. 그리고 세 번째 항은 외부정보(extrinsic information)값이다.

복호과정에서 앞 단의 구성 복호기에서 계산된 외부 정보는 인터리버를 거쳐서 다음 단의 구성 복호기에 대한 사전정보로 이용되기 때문에 보다 신뢰성 있는 연관성 출력값을 가지게 된다. 식 (2)로부터 i 번째 반복복호 후에 각 복호기의 출력값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1^{(i)}(\hat{a}_k) &= L_{e2}^{(i-1)}(\hat{a}_k) + L_c y_k + L_{e1}^{(i)}(\hat{a}_k) \\ L_2^{(i)}(\hat{a}_k) &= L_{e1}^{(i)}(\hat{a}_k) + L_c y_k + L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k) \end{aligned} \quad (3)$$

기존의 반복중단 알고리즘으로는 Hagenauer 등에 의해서 제안된 CE(Cross Entropy) 반복중단 알고리즘과 Shao 등에 의해서 제안된 SCR(Sign Change

Ratio)과 HDA(Hard Decision Aided) 반복중단 알고리즘이 있다^[3,4].

CE 반복중단 알고리즘은 각 반복과정에서 교차 엔트로피를 계산하고 현재 계산된 교차 엔트로피값과 첫 번째 반복에서 계산된 교차 엔트로피값을 이용하여 중단조건을 검사한다^[3]. i 번째 반복에서 교차 엔트로피, $T(i)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(i) = \sum_{k \in \Lambda} \frac{|L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k) - L_{e2}^{(i-1)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L^{(i-1/2)}(\hat{a}_k)|)} \quad (4)$$

여기서 $T(i) < \delta \cdot T(1)$ 을 만족할 경우 반복을 중단한다. δ 는 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 사이의 값을 갖으며 δ 가 작은 값일수록 성능의 저하없이 반복복호를 중단할 수 있다.

SCR 반복중단 알고리즘은 반복복호시 외부정보의 부호 변화를 검사하여 반복복호를 중단하는 것이다. 변화하는 부호의 갯수를 구하기 위해서 식 (4)를 식 (5)와 같이 근사화시킬 수 있다^[4].

$$\begin{aligned} T(i) &\approx \sum_{k \in \Lambda} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L^{(i-1)}(\hat{a}_k)|)} \\ &+ \sum_{k \in \Lambda} \frac{|\Delta L_{e1}^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\hat{a}_k)|)} \\ &= T_1(i) + T_2(i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $T_1(i)$ 는 $T_2(i)$ 에 비해서 매우 작기 때문에 식 (5)를 정리하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(i) \approx \sum_{k \in \Lambda} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\hat{a}_k)|)} \approx \delta_i C(i) \quad (6)$$

$C(i)$ 의 범위가 $C(i) \leq (0.005 \sim 0.03)N$ 이면 복호를 중단하게 된다.

HDA 반복중단 알고리즘은 현재의 경관정 출력값들이 이전 반복에서 복호된 경관정 출력값들과 일치할 경우 반복을 중단하는 것으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{sign}(L_2^{(i)}(\hat{a}_k)) = \text{sign}(L_2^{(i-1)}(\hat{a}_k)) \quad \text{all } k \in \Lambda \quad (7)$$

따라서 두 번째 구성 복호기의 이전 복호과정에서 얻어진 경관정 출력값들을 메모리에 저장하고, 이 저장되어 있는 값들과 현재 경관정 출력값들과의 이전 덧셈 연산의 결과값이 "0"이 되면 반복을 중단하게 된다.

III. 제안된 반복중단 알고리즘

본 논문에서 제안하는 반복복호 중단 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 터보복호기의 최종 연관성 출력값인

식 (2)에 대한 신뢰도를 측정하는 척도로서 LLR 절대값에 대한 분산값을 이용한다. 따라서, 현재 계산된 LLR 절대값의 분산값을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다.

이러한 LLR은 앞에서 언급한 식 (2)이며 두 번째 복호기의 최종 연관성 출력값인 LLR을 다시 쓰면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_2^{(i)}(\bar{a}_k) = L_{\mathcal{Y}_k} + L_{e1}^{(i)}(\bar{a}_k) + L_{e2}^{(i)}(\bar{a}_k) \quad (8)$$

먼저, LLR 절대값의 분산값을 구하는 수식은 식 (8)을 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[|L_2^{(i)}|] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |L_2^{(i)}(\bar{a}_k)|^2}{N} - \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |L_2^{(i)}(\bar{a}_k)|}{N} \right\}^2 \quad (9)$$

식 (9)의 LLR 절대값의 분산값(Var[|L₂⁽ⁱ⁾|])은 임의의 반복 횟수에 따른 분포를 고찰하기 위해서 계산하였다.

그림 2와 3은 반복복호 횟수 15, 구속장 4, 부호율 1/3에서 반복복호 횟수에 따른 BER 성능과 Var[|L₂⁽ⁱ⁾|]값을 나타내었다.

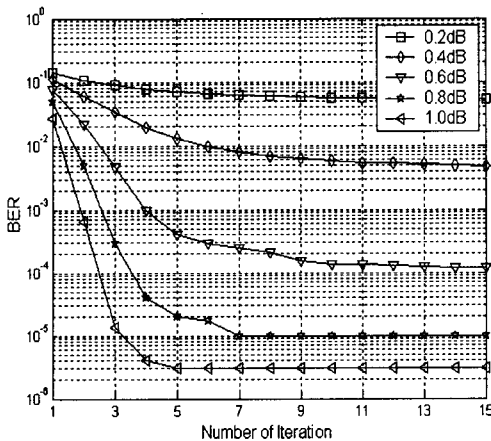


그림 2. 반복복호 횟수에 따른 BER 성능 곡선

그림 2에서와 같이 반복복호 횟수가 증가함에 따라 BER 성능이 크게 향상되지만 계속되는 반복복호에서 예러 마루현상이 나타나서 그 이후의 반복복호에서는 성능의 향상이 상대적으로 작게 나타난다. 이는 비트 오류가 더 이상 발생하지 않으며, 더 이상의 반복복호를 수행하여도 부호이득을 얻을 수 없음을 알 수가 있다. 따라서 의미있는 부호이득을 얻은 뒤에는 반복복호를

효율적으로 중단시킬 수 있는 반복중단 알고리즘이 필요하다라는 것을 알 수가 있다.

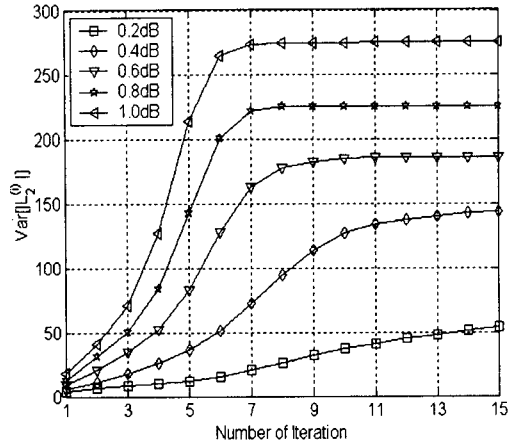


그림 3. 반복복호 횟수에 따른 Var[|L₂⁽ⁱ⁾|] 특성

그림 3에서와 같이 반복복호 횟수가 증가할수록 식 (9)에서 구한 LLR 절대값의 분산값(Var[|L₂⁽ⁱ⁾|])은 증가하다가 임의의 반복복호 횟수에서는 일정한 값으로 수렴함을 알 수가 있다.

따라서 Var[|L₂⁽ⁱ⁾|]값이 임의의 값 이상으로 나타날 때 추가적인 반복복호가 부호이득에 미치는 영향은 매우 작다. 그러므로 Var[|L₂⁽ⁱ⁾|]값을 중단조건으로 고려할 수 있다. 이에 근거하여 식 (9)를 이용하여 중단조건을 제시하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[|L_2^{(i)}|] > TH \cdot Var[|L_2^{(1)}|] \quad (10)$$

여기서 i는 반복복호의 횟수이며, TH는 반복복호를 중단하기 위한 임계값이다. 또한 중단조건은 시스템의 성능에 최대한 영향을 미치지 않도록 적절한 임계값을 설정해주어야 한다.

결론적으로, 터부호의 최종 연관성 출력값인 LLR 절대값의 분산을 이용한 반복중단 알고리즘은 각 반복복호시 터부호의 출력단에서 계산된 LLR 절대값의 분산값과 TH · Var[|L₂⁽¹⁾|]값을 비교하여 클 경우에는 반복을 중단한다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서는 기존의 반복중단 알고리즘과 제안된 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수와 BER 성능을 비교하기 위해서 모의실험을 수행하였다. 성능을 분석

하기 위한 파라미터로는 AWGN 환경에서 부호율 1/3, 생성다항식(15,17)인 구속장 (K)는 4이며 프레임 크기는 1024이다. 또한 랜덤 인터리버를 사용하였고, 복호 알고리즘은 Log-MAP 알고리즘을 사용하였으며 최대 반복복호 횟수는 15회로 하였다.

모의실험을 통해서 최대 15회 반복복호를 모두 수행한 경우와 기존의 반복중단 알고리즘 및 제안된 반복중단 알고리즘의 BER 성능을 그림 4에 나타내었다.

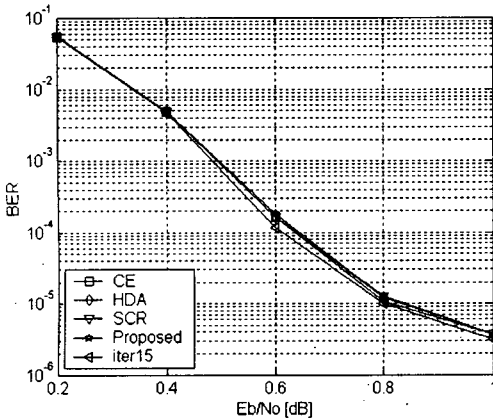


그림 4. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능 곡선

그림 4에서 CE 중단조건과 SCR 중단조건 임계값은 각각 0.001로 설정하였다. 기존의 반복중단 알고리즘과 제안된 반복중단 알고리즘의 경우, 모두 비슷한 BER 성능을 나타냄을 알 수가 있다. 그리고 최대 반복복호 횟수인 15회와 비교해서 BER 손실이 거의 나타나지 않음을 확인하였다.

표 1. 평균 반복복호 횟수의 비교

[dB]	반복중단 알고리즘				
	고정	CE	HDA	SCR	Proposed
0.2	15	11.3462	11.8537	11.6268	11.6100
0.4	15	7.1050	6.9243	6.8537	6.5868
0.6	15	4.5956	4.5337	4.4881	4.2718
0.8	15	3.5668	3.6387	3.5893	3.5200
1.0	15	3.0906	3.1562	3.1300	3.0375

표 1은 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것으로 제안된 반복중단 알고리즘은 기존의 반복중단 알고리즘에 비해서 평균 반복복호 횟수가 감소함을 알 수가 있다.

본 논문에서는 반복복호를 통하여 복호동작을 수행할 때 발생하는 복호지연을 감소시킬 수 있는 새로운 반복중단 알고리즘을 제안하였다. 제안된 반복중단 알고리즘은 반복복호 과정에서 연판정 출력인 LLR 절대값에 대한 분산값을 중단조건으로 이용하였다. 모의실험 결과 BER 성능은 최대 반복복호시의 BER 성능에 매우 근접하였고, 평균 반복복호 횟수는 기존의 SCR, HDA, CE 반복중단 알고리즘보다 평균 반복복호 횟수가 감소함을 알 수가 있었다.

따라서 연판정 출력을 이용하는 반복 복호기에 제안된 반복중단 알고리즘이 적용될 경우에 복호지연 감소의 효과가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near shannon limit error correcting coding and decoding : turbo codes," in *Proc. ICC93*, pp. 1064-1070, May 1993.
- [2] S. Pietrobon, "Implement and Performance of a Turbo/MAP Decoder," *Int. J. Satellite Commu.*, vol. 16, pp. 23-46, Jan.-Feb. 1998.
- [3] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes," *IEEE Trans. Inform Theory*, vol. 42, no. 2, pp. 429-445, Mar. 1996.
- [4] Rose Y. Shao, Shu Lin, and Marc P. C. Fossorier "Two Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.

V. 결 론