

효율적인 반복중단 알고리즘을 갖는 터보부호 설계

심 병 섭, 정 대 호, 김 환 용
원광대학교

전화 : 063-850-6740 / 팩스 : 063-857-3999

Design of Turbo Codes with Efficient Iterative Decoding Stop Criterion

Byoung Sup Shim, Dae Ho Jeong, Hwan Yong Kim
Wonkwang University
E-mail : shim@wonkwang.ac.kr

Abstract

In this paper, it proposes the efficient iterative decoding stop criterion using the variance value of LLR. It is verifying that the proposal iterative decoding stop criterion can be reduced the average iterative decoding number. The proposal algorithm and hardware synthesize to use the Synopsys Tool, performance validations perform through the ModelSim.

I. 서 론

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

터보부호의 복호기는 연판정(soft-decision)값을 출력하는 SISOF(Soft-input Soft-output) 방식을 사용하며 터보부호의 구조상 2개의 복호기로 구성된다^[1,2]. 각 복호기가 생성하는 연판정값을 다른 복호기에 넘겨주어 반복복호를 수행한다. 일반적으로 고정된 반복복호 횟수를 고려할 경우 다양한 채널환경에서 SNR이 증가할 때 무의미한 반복이 이루어져서 복호지연과 연산량이 증가하게 된다. 따라서 무의미한 반복에 의한 연산량과 복호지연을 줄이기 위해서는 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 반복중단 기법이 필요하게 된다.

본 논문에서는 고정된 반복 횟수 이전에 중단시킬 수 있는 기법으로서 연판정 출력값에 대한 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 새로운 반복중단 알고리즘을 제안하고 하드웨어로 설계한다.

II. 반복중단 알고리즘

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

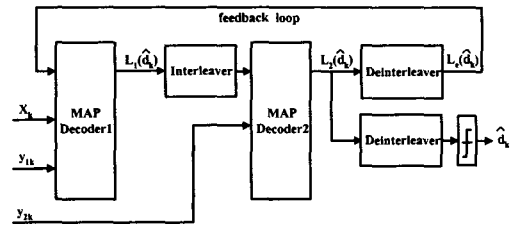


그림 1. 터보 복호기

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.

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

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 세가지 항의 합으로 나타낼 수 있다.

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

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 신뢰도로써 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 연판정

출력값을 가지게 된다. 식 (2)로부터 i 번째 반복복호 후에 각 복호기의 출력값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1^{(i)}(\hat{d}_k) &= L_{e2}^{(i-1)}(\hat{d}_k) + L_{c\mathcal{Y}_k} + L_{e1}^{(i)}(\hat{d}_k) \\ L_2^{(i)}(\hat{d}_k) &= L_{e1}^{(i)}(\hat{d}_k) + L_{c\mathcal{Y}_k} + L_{e2}^{(i)}(\hat{d}_k) \end{aligned} \quad (3)$$

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^[2,3].

CE 반복중단 알고리즘은 각 반복과정에서 CE를 계산하고 현재 계산된 CE 값과 첫 번째 반복에서 계산된 CE 값을 이용하여 중단조건을 검사한다^[2]. i 번째 반복에서 cross entropy, $T(i)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(i) = \sum_{k=1}^N \frac{|L_{e2}^{(i)}(\hat{d}_k) - L_{e2}^{(i-1)}(\hat{d}_k)|^2}{\exp(|L_{e1}^{(i-1/2)}(\hat{d}_k)|)} \quad (4)$$

여기서 $T(i) < (10^{-2} \sim 10^{-4}) \cdot T(1)$ 을 만족할 경우 반복을 중단한다.

SCR 반복중단 알고리즘은 반복복호시 외부정보의 부호 변화를 검사하여 반복복호를 중단하는 것으로 식 (4)를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$T(i) \approx \sum_{k \in \Lambda} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(\hat{d}_k)|^2}{\exp(|L_{e1}^{(i-1)}(\hat{d}_k)|)} \approx \delta_i C(i) \quad (5)$$

$C(i)$ 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 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{sign}(L_2^{(i)}(\hat{d}_k)) = \text{sign}(L_2^{(i-1)}(\hat{d}_k)) \quad \text{all } k \in \Lambda \quad (6)$$

III. 제안된 반복중단 알고리즘

본 논문에서 제안하는 LLR의 분산값에 의한 반복중단 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 터보 복호기의 최종 연관정 출력값인 식 (2)에 대한 신뢰도를 측정하는 척도로서 LLR에 대한 분산값을 이용한다. 현재 계산된 LLR의 분산값을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다.

식 (1)은 수신 정보열이 R_1^N 일 때 정보비트 d_k 가 '1'일 확률과 '0'일 확률의 로그비율이다. 따라서 $L(\hat{d}_k | R_1^N)$ 가 양(+)의 값일 경우에는 정보비트 d_k 가 '1'일 확률이 '0'일 확률에 비해서 더 크다는 것을 나타내므로 복호되는

값은 '1'이 되고, $L(\hat{d}_k | R_1^N)$ 가 음(-)의 값일 경우에는 정보비트 d_k 가 '0'일 확률이 '1'일 확률에 비해서 더 크다는 것을 나타내므로 복호되는 값은 '0'이 된다.

먼저, LLR의 분산값을 구하는 수식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Var}[L_2^{(i)}] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} L_2^{(i)}(\hat{d}_k)^2}{N} - \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} L_2^{(i)}(\hat{d}_k)}{N} \right\}^2 \quad (7)$$

여기서 터보 복호기의 최종 연관정 출력값 $L_2^{(i)}(\hat{d}_k)$ 와 그 구성 요소인 채널 신뢰도 L_c 값, 외부정보 L_e 값 및 사전정보 L_a 값들이 임의의 반복 횟수에 따른 분포를 고찰하기 위해서 식 (7)을 이용해서 터보 복호기의 LLR에 대한 분산값을 계산하였다.

터보부호의 반복복호가 진행됨에 따라서 터보 복호기의 최종 연관정 출력값인 $L_2^{(i)}(\hat{d}_k)$ 는 증가하게 되고, 이에 따라서 식 (7)의 LLR의 분산값도 증가하게 된다.

따라서 어떠한 임계값 이상의 LLR의 분산값이 나타날 때 추가적인 반복복호가 부호이득에 미치는 영향은 매우 작게 되므로 LLR의 분산값을 중단조건으로 고려할 수 있다. 이에 근거하여 식 (7)을 이용하여 중단조건을 제시하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Var}[L_2^{(i)}] > TH \quad (8)$$

여기서 TH 는 반복복호를 중단하기 위한 임계값이다. 결론적으로, 터보부호의 최종 연관정 출력값인 LLR의 분산값을 이용한 반복중단 알고리즘은 각 반복복호시 터보 복호기의 출력단에서 계산된 LLR의 분산값과 임계값을 비교하여 상기 임계값보다 클 경우에는 반복을 중단한다.

IV. 터보부호의 설계

본 논문에서 설계된 하드웨어는 크게 터보 부호기와 터보 복호기 및 터보부호 시스템의 복호성능을 향상시키기 위한 반복 횟수 제어기로 구성된다. 터보 복호기의 복호 알고리즘은 하드웨어 구현에 적합한 log-MAP 알고리즘을 적용하여 설계하였고, 반복 횟수 제어기는 본 논문에서 제안한 반복중단 알고리즘을 적용하여 하드웨어로 설계하였다.

본 논문에서 설계된 터보부호 시스템 및 새로운 반복중단 알고리즘은 그 상위 블럭과 각각의 기능 블럭들을 VHDL code를 이용하여 Synopsys Tool로 합성하였으며 각 내부 기능 블럭들의 기능적 동작은 ModelSim을 이용하여 검증하였다.

그림 2는 본 논문에서 설계된 길쌈 부호기, 주소 생

성기, 인터리버, 입력 지연기 및 펄처링부를 포함하는 전체 터보 부호기의 합성된 회로도이다.

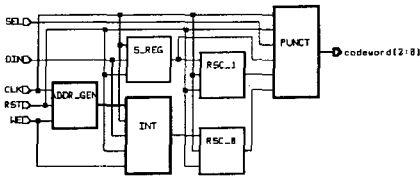
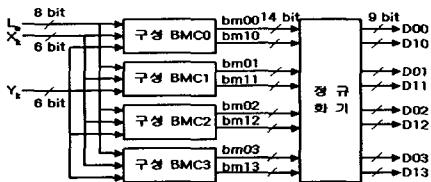
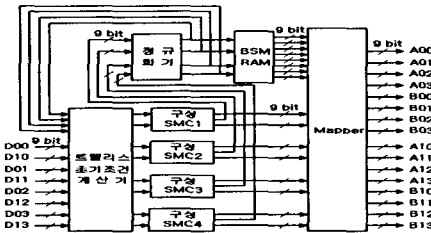


그림 2. 터보 부호기

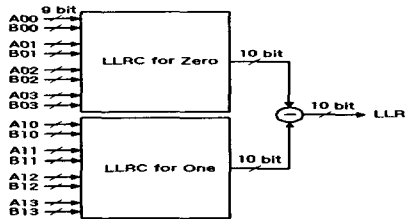
log-MAP 방식의 터보 복호기의 주요 구성요소는 가지메트릭 계산부, 상태메트릭 계산부, LLR 계산부등이 있으며 이들에 대한 개략도는 그림 3과 같다.



(a) 가지메트릭 계산부



(b) 상태메트릭 계산부



(c) LLR 계산부

그림 3. log-MAP 복호기의 주요 구성요소

반복 횟수 제어기는 log-MAP 복호기의 LLR 계산부에서 출력된 LLR 값을 입력받아서 메모리에 저장하고 LLR에 대한 분산값을 계산한다. 계산된 분산값이 기설정된 임계값과 비교하여 클 경우에 반복복호 중단 신호를 발생하고 반복복호를 중단하도록 설계하였다. 그림 4는 본 논문에서 설계된 전체 반복 횟수 제어기의

합성된 회로도이다.

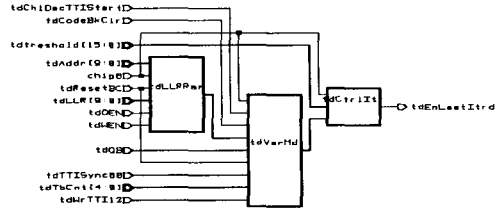


그림 4. 반복 횟수 제어기

V. 모의실험 및 결과

본 논문에서는 기존의 반복중단 알고리즘과 제안된 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수와 BER 성능을 비교하기 위해서 모의실험을 수행하였다. 성능을 분석하기 위한 파라미터를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 성능분석을 위한 파라미터

채널, 변조방식	AWGN, BPSK
구속장(K), 구성부호(G)	$K = 4, G = (15, 17)_8$
부호율(R)	$R = 1/3$
인터리버	랜덤 인터리버
반복중단조건	CE, HDA, SCR, Proposed
요구된 BER	10^{-6}

그림 5는 최대 15회 반복복호를 모두 수행한 경우와 기존의 반복중단 알고리즘 및 제안된 반복중단 알고리즘의 BER 성능을 나타내었다.

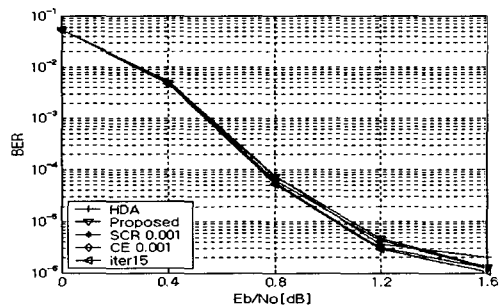


그림 5. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능 곡선

그림 5에서 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 2는 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것으로써 제안된 반복중단 알고리즘은 기존의 반복중단 알고리즘에 비해서 평균 반복복호 횟수가 감소함을 알 수가 있다. 또한 CE 반복중단 알고리즘과 비교할 때 최대 4.5% 정도의 평균 반복복호 횟수가 감소함을 확인하였다. 전체적으로 제안된 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 감소하며 BER 성능은 비교적 좋게 나타났다.

표 2. 각 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수의 비교

[dB]	반복중단 알고리즘					감소율(%) (CE와 비교)
	고정 반복	SCR	HDA	CE	Proposed	
0.0	15	11.6143	11.7693	11.8718	11.6156	2.16 %
0.8	15	4.4950	4.5425	4.6025	4.4093	4.20 %
1.6	15	3.1250	3.1706	3.0881	2.9343	4.50 %

그림 6은 15번의 고정 반복 횟수를 설정하고 기존의 터보 복호기에 대한 모의실험을 수행하였다. 그림 6에서 15회 반복을 수행하면서 복호된 데이터 tdoedata1bit는 출력을 위한 메모리에 저장되고, tdenread 신호에 의해서 prdatatcd의 32bit 데이터로 출력된다. 15회 반복복호된 데이터는 19.95[ms] 후에 출력됨을 확인하였다.

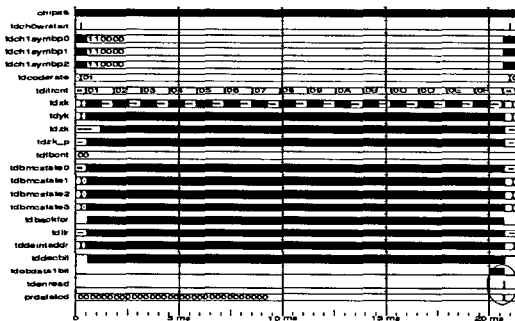


그림 6. 기존 터보 복호기의 모의실험

그림 7은 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 반복 횟수 제어기를 포함한 터보 복호기의 모의 실험 결과이다. 반복중단 신호인 tdenlastitrd 신호가 '1'일 때 반복복호를 중단하고 복호된 데이터를 출력한다.

제안된 반복중단 알고리즘을 적용하여 모의 실험한 결과 4회 반복을 수행한 후 반복복호를 중단 하였다. 4회 반복복호된 데이터는 5.86[ms] 후에 출력됨을 확인 하였다.

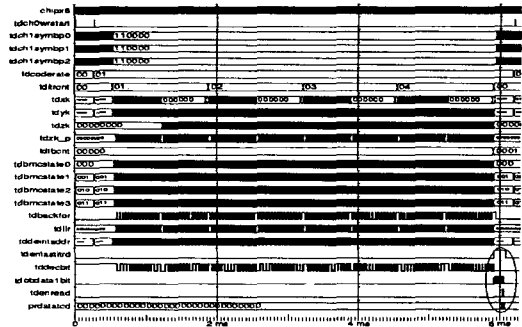


그림 7. 제안된 터보 복호기의 모의실험

VI. 결 론

본 논문에서는 반복복호 과정에서 연판정 출력값에 대한 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실 없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 반복중단 알고리즘을 제안하였다.

제안된 반복중단 알고리즘은 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수에서 기존의 반복중단 알고리즘보다 감소하였다. 특히, CE 반복중단 알고리즘과 비교할 때 2.16 ~ 4.5% 정도의 평균 반복복호 횟수가 감소함을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘과 그 알고리즘을 적용한 터보부호 시스템이 이동통신 분야에 적용될 경우, 복호 지연시간의 단축으로 인하여 고속 전송 및 멀티미디어 통신 서비스를 효율적으로 지원할 수 있으며 시스템의 효율을 높이는 데 탁월한 효과를 거둘 수 있으리라고 사료된다.

감사의 글

본 논문에 사용된 CAD Tool 및 장비는 반도체설계 교육센터(IDECC)의 지원으로 이루어졌습니다.

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] 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.
- [3] 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.