

논문 2005-42SD-6-2

터보부호의 계산량 감소를 위한 효율적인 반복중단 알고리즘

(An Efficient Iterative Decoding Stop Criterion Algorithm for Reducing Computation of Turbo Code)

정 대 호*, 임 순 자*, 김 환 용*

(Dae-Ho Jeong, Soon-Ja Lim, and Hwan-Yong Kim)

요 약

터보부호는 반복복호가 진행됨에 따라서 AWGN 채널 환경에서 BER 성능이 향상된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 다양한 채널 환경하에서 반복복호 횟수가 증가하면 무의미한 반복이 이루어져서 복호하는데 필요한 복호 지연시간과 계산량이 증가하게 되는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 터보부호의 계산량과 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다. 제안된 반복중단 알고리즘은 고정된 반복 횟수 이전에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 기법으로써 터보부호기의 최종 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 계산량과 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 모의실험 결과, 제안된 알고리즘의 계산량은 SCR 알고리즘과는 비슷하였으나 CE 알고리즘과 비교하여 약 40% 정도 줄일 수 있었다. 또한, 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 HDA 알고리즘이나 SCR 알고리즘과 비교하여 높은 SNR에서 각각 최대 9.94%와 8.32% 정도의 감소효과를 나타냈으며 CE 알고리즘과 비교하여 약 2.16%~7.84% 정도의 감소효과를 나타내었다.

Abstract

It is well known about the fact that turbo code has better the BER performance as the number of decoding iterations increases in the AWGN channel environment. However, as the number of decoding iterations is increased under the several channel environments, any further iteration results in very little improvement, and it requires much delay and computation in proportion to the number of decoding iterations. In this paper, it proposes the efficient iterative decoding stop criterion algorithm which can largely reduce the computation and the average number of decoding iterations of turbo code. Through simulations, it is verifying that the proposed algorithm can efficiently stop the iterative decoding by using the variance value of LLR, and can largely reduce the computation and the average number of decoding iterations without BER performance degradation. As a result of simulation, the computation for the proposed algorithm is reduced by about 40% compared to conventional CE algorithm. The average number of decoding iterations for the proposed algorithm is reduced by about 9.94% and 8.32% compared to conventional HDA and SCR algorithm respectively, and by about 2.16%~7.84% compared to conventional CE algorithm.

Keywords: Turbo Code, Iterative Decoding, Stop Criterion Algorithm, Variance Value

I. 서 론

디지털 이동통신 시스템은 무선채널의 특성상 데이터를 전송하는 경우 채널상에서 발생할 수 있는 페이

딩, 간섭, 잡음 등의 여러가지 원인에 의해서 비트 오류가 발생할 확률이 매우 높다. 그러므로 이동통신 채널 환경에서 이용되는 채널 부호화 기술은 왜곡된 신호로부터 전송된 정보를 보호하기 위해 매우 중요한 요소기술이다. 최근에 IMT-2000의 차세대 이동통신 시스템에서 전송속도가 32kbps 이상의 고속 데이터 전송용 채널 부호의 표준으로 채택된 터보부호는 2개의 RSC (Recursive Systematic Convolutional) 부호와 인터리버를 병렬로 연결하여 부호화하며 반복복호(iterative decoding)를 통하여 복호 동작을 수행하게 된다. 이러한

* 정회원, 원광대학교 전기전자 및 정보공학부
(Department of Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00330-0) 및 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

접수일자 : 2005년2월24일, 수정완료일 : 2005년5월9일

터보부호는 인터리버의 크기가 크고 반복복호가 충분히 수행되었을 때 비트 에러를 관점에서 사는 한계에 근접하는 아주 우수한 오류정정 능력을 가지는 것으로 알려져 있다^[1].

터보부호의 복호기는 두 개의 복호기로 구성된다. 첫 번째 복호기는 두 번째 복호기의 연판정(soft-decision) 값으로부터 외부정보(extrinsic information) 값을 구하고 이 값을 사전확률(a priori probability) 값으로 사용하여 추정(estimate)된 정보비트를 출력하게 되며 이들 간에 외부정보를 반복적으로 교환함으로써 복호 동작을 수행하게 된다. 이러한 반복복호 동작은 터보부호의 복호 과정에서 반복 횟수가 증가할수록 BER 성능은 점차 좋아지게 되지만 고정된 반복 횟수를 고려하면 다양한 채널 환경에서 임의의 반복 후에는 BER 성능의 향상은 아주 작게 나타난다. 또한, SNR이 증가할 경우에는 무의미한 반복이 이루어져서 복호하는데 필요한 복호 지연시간과 계산량이 증가하게 되고 전력소모 또한 커지게 되는 단점을 가진다^[2].

본 논문에서는 복호기에서의 불필요한 복호 지연 시간과 계산량 및 전력소모를 줄일 수 있는 방법으로써 터보복호기의 최종 출력값인 LLR(Log Likelihood Ratio)의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 계산량과 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 LLR의 분산값을 이용 새로운 알고리즘은 기존의 알고리즘과 비교하여 모든 SNR 영역에서 계산량 뿐만 아니라 평균 반복복호 횟수도 크게 감소하는 장점을 가지고 있다.

II. 반복복호 알고리즘

터보부호의 복호기는 복호 알고리즘에 따라서 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) 방식의 복호기와 MAP(Maximum a Posteriori) 방식의 복호기로 분류한다. 이러한 터보부호의 복호는 연판정 값을 출력하는 SISO (Soft Input/Soft Output) 복호방법을 통한 반복복호에 의해서 이루어진다^[3,4]. 그림 1은 직렬로 연결된 2개의 MAP 복호기와 인터리버 및 디인터리버로 구성된 터보복호기의 구조를 나타낸다.

터보부호의 반복복호는 복호기에서 연판정 값을 출력하므로써 현재 수행되어진 복호의 신뢰도를 판단하고 반복적으로 복호를 수행하므로써 BER 성능을 향상시키게 된다. 터보부호의 복호 과정에서 복호기의 출력값

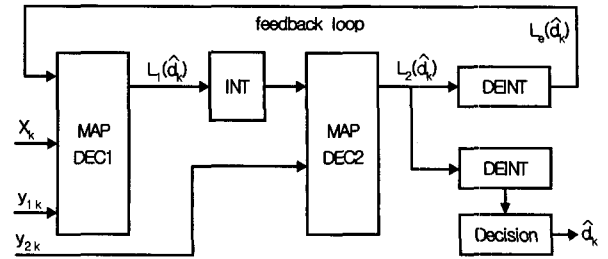


그림 1. 터보복호기의 구조
Fig. 1. Structure of turbo code.

은 LLR 값으로 표현되어 진다. 수신 신호열을 R_1^N 이라 할 때 정보비트 d_k 에 대한 LLR 출력값은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서 N 은 인터리버의 크기이며 \hat{a}_k 는 추정된 정보비트를 나타낸다. 식 (1)에서 LLR 출력값은 수신 신호열이 R_1^N 일 때 정보비트 d_k 가 “1”일 확률과 “0”일 확률의 비에 로그(log)를 취한 값을 알 수가 있다. 이러한 LLR 출력값은 식 (2)와 같이 세 가지 항의 합으로 나타낼 수 있다.

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

식 (2)에서 첫 번째 항, $L_a(d_k)$ 는 정보비트 d_k 에 대한 사전정보(a priori information) 값이고 두 번째 항, $L_c x_k$ 는 수신된 채널의 신뢰정보 값이다. 여기서 L_c 는 채널의 신뢰도(reliability)로써 가우시안 채널에서는 $2/\sigma^2$ 의 값을 갖는다. 그리고 세 번째 항, $L_e(\hat{a}_k)$ 은 추정된 정보비트 d_k 에 대한 외부정보 값이다. 첫 번째 복호기에서 계산된 외부정보 값은 복호 과정에서 인터리버를 거쳐서 두 번째 복호기에 대한 사전정보 값으로 이용되기 때문에 보다 신뢰성 있는 연판정 출력값을 가지게 된다.

식 (2)로부터 i 번째 반복복호 후에 첫 번째 복호기와 두 번째 복호기에 대한 각각의 LLR 출력값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

터보부호의 복호 과정에서 반복 횟수가 증가할수록

식 (3)에 주어진 LLR 출력값에 대한 신뢰도가 증가하게 되어 BER 성능이 향상된다. 그러나 반복복호 횟수의 증가와 더불어 복호기에서의 복호 지연시간과 계산량이 증가하는 단점을 가진다. 이러한 문제점을 해결하는 방법으로 복호기에서 미리 정해진 횟수만큼 반복복호를 수행하는 것이 아닌 가변적으로 반복복호를 중단시킬 수 있는 기존의 반복중단 알고리즘으로 Hagenauer에 의해서 제안된 CE(Cross Entropy) 알고리즘^[5]과 Shao에 의해서 제안된 SCR (Sign Change Ratio)과 HDA (Hard Decision Aided) 알고리즘^[6] 등이 있다.

최근에 연구된 반복중단 알고리즘으로 현재 반복에서 각 복호기의 외부정보 값에 대하여 분산을 구한 후에 그 차이값을 이용하여 반복을 중단시키는 방법^[7]이 있으나 이러한 방법은 BER 성능은 우수하지만 임계값과 분산값을 저장해야 하므로 계산량과 하드웨어 복잡도가 증가하는 단점을 가지고 있다.

CE 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 교차 엔트로피(cross entropy) 값을 계산하는 것으로써 현재 계산된 교차 엔트로피 값과 첫 번째 반복복호 과정에서 계산된 교차 엔트로피 값을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다^[5]. i 번째 반복에서 교차 엔트로피 값, $T(i)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(i) = \sum_{k=1}^N \frac{|L_{\mathcal{L}}^{(i)}(\mathbf{a}_k) - L_{\mathcal{L}}^{(i-1)}(\mathbf{a}_k)|^2}{\exp(|L^{(i-1/2)}(\mathbf{a}_k)|)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $L_{\mathcal{L}}^{(i)}(\mathbf{a}_k)$ 는 i 번째 반복에서의 두 번째 복호기의 외부정보 값을 나타내고, $L^{(i-1/2)}(\mathbf{a}_k)$ 는 i 번째 반복에서 첫 번째 복호기의 LLR 출력값을 나타내며, $T(i) < \delta \cdot T(1)$ 을 만족할 경우에 반복을 중단한다. 여기서 반복복호를 중단하기 위한 기준값인 δ 는 상수값으로써 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 사이의 값을 가지며 δ 가 작은 값일수록 BER 성능의 손실없이 반복복호를 중단할 수 있다고 알려져 있다. 이러한 CE 알고리즘은 교차 엔트로피 값을 계산하기 위해서 식 (4)에 나타난 바와 같이 지수 함수와 같은 복잡한 계산을 포함하고 있기 때문에 계산량이 증가하게 되고 하드웨어 구현상의 어려움이 존재하게 된다.

SCR 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 외부정보의 부호 변화율을 계산하는 것으로써 현재 계산된 부호 변화율과 첫 번째 반복복호 과정에서 계산된 부호 변화율을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다. 변화하는 부호의 갯수를 구하기 위해서 식 (4)를 식 (5)와 같이 두 개

의 합으로 근사화시킬 수 있다^[6].

$$T(i) \approx \sum_{k \in \Lambda_1} \frac{|\Delta L_{\mathcal{L}}^{(i)}(\mathbf{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\mathbf{a}_k)|)} + \sum_{k \in \Lambda_2} \frac{|\Delta L_{\mathcal{L}}^{(i)}(\mathbf{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\mathbf{a}_k)|)} \quad (5)$$

$$= T_1(i) + T_2(i)$$

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

$$T(i) \approx \sum_{k \in \Lambda_1} \frac{|\Delta L_{\mathcal{L}}^{(i)}(\mathbf{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\mathbf{a}_k)|)} \approx \delta_i \cdot C(i) \quad (6)$$

여기서 δ_i 는 $k \in \Lambda \setminus \Lambda_1$ 에 해당되는 정보 심볼에 대해서 식 (5)의 평균값으로 정의한다. 또한, $C(i)$ 는 각 반복복호 과정에서 출력되는 외부정보 값에 대하여 부호가 변화하는 갯수를 나타내는 것으로 $C(i)$ 의 범위가 $C(i) \leq (0.005 \sim 0.03) \cdot N$ 을 만족할 경우에 복호를 중단하게 된다.

HDA 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 복호기의 최종 출력값인 경판정 값을 경판정기를 통해서 경판정(hard-decision)한 최종 복호 데이터에 대한 부호의 일치 여부를 이용하여 중단조건을 검사하게 된다. 따라서 현재 출력된 경판정 출력값의 부호와 이전 복호 과정에서 출력된 경판정 출력값의 부호를 비교하여 반복복호를 중단하는 것으로 중단조건은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$\text{sign}(L_2^{(i)}(\mathbf{a}_k)) = \text{sign}(L_2^{(i-1)}(\mathbf{a}_k)) \quad (7)$$

HDA 알고리즘은 두 번째 복호기의 이전 복호 과정에서 얻어진 경판정 출력값들을 메모리에 저장하고 저장된 값들과 현재 출력된 경판정 값과의 이진 덧셈연산의 결과값이 “0”이 되면 반복을 중단하게 된다.

동일한 반복 횟수를 가정하고 위에서 살펴본 반복중단 알고리즘들의 계산량을 비교해 보면 CE 알고리즘은 교차 엔트로피를 계산하기 위해서 이전 복호 과정에서 계산된 외부정보 값을 필요로 하므로 $N+2$ 개의 실수 값을 저장할 수 있는 메모리가 필요하고 각 반복복호 과정에서 $2N-1$ 번의 덧셈연산, N 번의 곱셈연산, N 번의 나눗셈연산과 N 번의 지수연산이 필요하게 된다. SCR 알고리즘은 $3N-1$ 번의 정수연산과 $N+2$ 개의

정수 메모리가 필요하며 HDA 알고리즘은 N 비트를 저장할 수 있는 메모리가 필요하고 각 반복복호 과정에서 N 번의 2진연산이 필요하게 된다. 따라서, SCR 알고리즘이나 HDA 알고리즘은 CE 알고리즘과 비교할 때 계산량이 훨씬 적다는 장점을 가진다.

동일한 BER 성능을 가정하고 평균 반복복호 횟수를 비교해 보면 HDA 알고리즘은 낮은 SNR에서 중간 정도의 SNR까지는 평균 반복복호 횟수가 감소하는 장점이 있으나 높은 SNR에서는 반복 횟수가 증가하여 CE 알고리즘이나 SCR 알고리즘보다도 비효율적임을 알 수가 있다.

이상에서 살펴본 반복중단 알고리즘들을 비교해 보면 CE 알고리즘은 임계값(0.001)이 큰 값일수록 평균 반복복호 횟수는 감소하지만 부가적인 복잡도가 매우 크게 나타나는 단점을 가지고 있으며 SCR 알고리즘은 BER 성능면에서 손실이 발생하고 HDA 알고리즘은 반복 횟수가 증가하는 단점을 가진다.

이러한 문제점은 데이터의 고속 전송과 전력소모의 최적화가 요구되는 디지털 이동통신 시스템에 터보부호를 적용하기 위해서 반드시 해결해야 할 문제로 대두되고 있다. 따라서 무의미한 반복에 의한 복호 지연시간과 계산량을 줄이기 위해서는 적절한 반복 후에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 중단조건(stop criterion)이 필요하게 된다.

III. 제안된 반복중단 알고리즘

본 논문에서는 고정된 반복 횟수 이전에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 기법으로써 터보복호기의 최종 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 성능의 손실없이 계산량과 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다.

식 (1)에 정의된 터보복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR 출력값은 정보비트 d_k 에 대한 신뢰도를 나타낸 것으로서 LLR 출력값이 양 (+)의 값일 경우에는 정보비트 d_k 가 "1"일 확률이 "0"일 확률에 비해서 더 크다는 것을 나타내므로 복호되는 값은 "1"이 되고 LLR 출력값이 음 (-)의 값일 경우에는 정보비트 d_k 가 "0"일 확률이 "1"일 확률에 비해서 더 크다는 것을 나타내므로 복호되는 값은 "0"이 된다. 따라서 식 (1)에 나타난 터보복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR 출

력값에 대해서 분산값을 구하는 수식을 유도하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[L_2^{(i)}] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} L_2^{(i)}(\bar{a}_k)^2}{N} - \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} L_2^{(i)}(\bar{a}_k)}{N} \right\}^2 \quad (8)$$

식 (8)을 통해서 얻어지는 터보복호기의 최종 연판정 출력값 $L_2^{(i)}(\bar{a}_k)$ 와 그 구성 요소인 채널 신뢰도 L_c 값, 외부정보 L_e 값 및 사전정보 L_a 값들이 임의의 반복 횟수에 따라서 어떠한 분포를 이루는지를 살펴보기 위해서 MATLAB Tool을 사용하여 그 값들을 추출하였고, 식 (8)을 이용하여 터보복호기의 LLR 값에 대한 분산값을 계산하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 파라미터 추출을 위한 E_b/N_0 는 0.8[dB]로 설정하였고, i 는 반복복호 횟수이며, $Var[L_2^{(i)}]$ 는 i 번째 반복복호에서 LLR 값에 대한 분산값을 나타낸다.

표 1에서와 같이 식 (8)에서 주어진 LLR 값에 대한 분산값이 증가하면 BER 성능도 향상된다. 그러나 임의의 반복 횟수에서는 비트 오류(bit error)가 더 이상 발생하지 않으며 더 이상의 반복복호를 수행하여도 부호

표 1. 반복 횟수에 따른 터보복호기의 출력값
Table.1. Output value of turbo decoder according to iteration number.

반복 횟수	오류 갯수	L_{e2}	L_{a2}	L_{c2}	$L_2^{(i)}(\bar{a}_k)$	$Var[L_2^{(i)}]$
1	108	32.5606	-27.8703	45.5299	50.2202	22.8223
2	51	32.5606	-34.7144	109.1477	106.9940	46.3942
3	16	32.5606	51.4953	160.9017	244.9576	77.8233
4	2	32.5606	183.9298	267.8322	484.3226	173.3949
5	0	32.5606	383.8083	417.0286	833.3974	369.9084
6	0	32.5606	646.0160	753.2164	1431.7930	745.1301
7	0	32.5606	756.1419	992.1154	1780.8179	1324.0499
8	0	32.5606	997.7640	1252.1116	2282.4362	1950.9238
9	0	32.5606	1144.4451	1385.3125	2562.3182	2401.2303
10	0	32.5606	1188.8540	1420.1370	2641.5517	2596.6284
11	0	32.5606	1177.5377	1424.4962	2638.5945	2635.4337
12	0	32.5606	1177.4136	1424.7529	2634.7270	2637.8179
13	0	32.5606	1177.1034	1424.7624	2634.4264	2637.9394
14	0	32.5606	1177.0956	1424.7621	2634.4182	2637.9425
15	0	32.5606	1177.0955	1424.7620	2634.4181	2637.9425

이득(coding gain)을 얻을 수 없음을 알 수가 있다. 또한 임의의 반복 횟수에서 식 (8)의 LLR 값에 대한 분산값이 임의의 임계 (TH : threshold)값보다도 더 큰 값에 도달하게 되면 LLR 값에 대한 분산값은 어떤 값으로 수렴하고 있음을 알 수가 있다. 따라서 어떠한 임계값 이상의 LLR의 분산값이 나타날 때 추가적인 반복복호가 부호이득에 미치는 영향은 매우 작게 되므로 LLR 값에 대한 분산값을 반복복호 중단조건으로 고려할 수 있다.

이에 근거하여 식 (8)을 이용하여 반복복호를 중단시키기 위한 중단조건을 제시하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[L_2^{(i)}] > TH \tag{9}$$

여기서 i 는 반복복호 횟수이며, TH 는 반복복호를 중단하기 위한 임계값이고, $Var[L_2^{(i)}]$ 는 i 번째 반복복호에서 LLR의 분산값을 나타낸다.

본 논문에서 제안된 LLR의 분산값을 이용한 터보부호의 효율적인 반복중단 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 터보복호기의 LLR 출력값에 대한 신뢰도를 측정하는 척도로써 LLR의 분산값을 이용한다. 따라서 현재 계산된 LLR의 분산값을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다.

터보부호의 복호 과정에서 반복복호를 효율적으로 중단시키기 위한 임계값은 시스템의 성능에 최대한 영향을 미치지 않도록 적절하게 설정해 주어야 하며 적용될 시스템에서 요구하는 성능에 따라서 그 값은 100~10000의 값을 갖는다. 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘에서 적용할 임계값은 여러 번의 모의실험을 통해서 1000으로 설정하였다.

그림 2는 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 구조를 나타낸다. 여기서 반복 횟수 제어기는 터보복호기의 LLR 계산부에서 출력된 LLR 값을 입력으로 받아서 메모리에 저장한 후에 LLR 값에 대한 분산값을 계산한다. 계산된 분산값이 기 설정된 임계값과 비교하여 클 경우에 반복복호 중단신호를 발생시키고 반복복호를 중단하도록 설계하였다.

본 논문에서 설계된 반복 횟수 제어기의 내부 구성 블록으로는 연판정 값 저장부, 분산값 계산부, 반복 횟수 제어부로 구성되며 반복 횟수 제어부는 3개의 하부 기능 블록인 임계값 저장부, 비교부, 반복중단 신호 출력부로 구성할 수 있다.

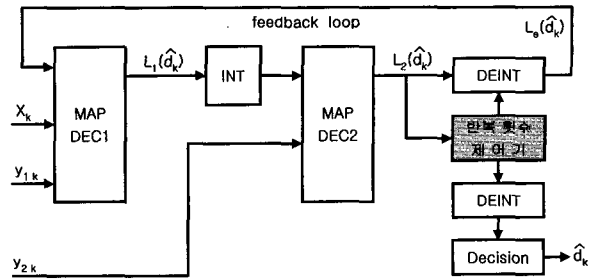


그림 2. 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 구조

Fig. 2. Structure of turbo decoder applying the proposed iterative decoding stop criterion algorithm.

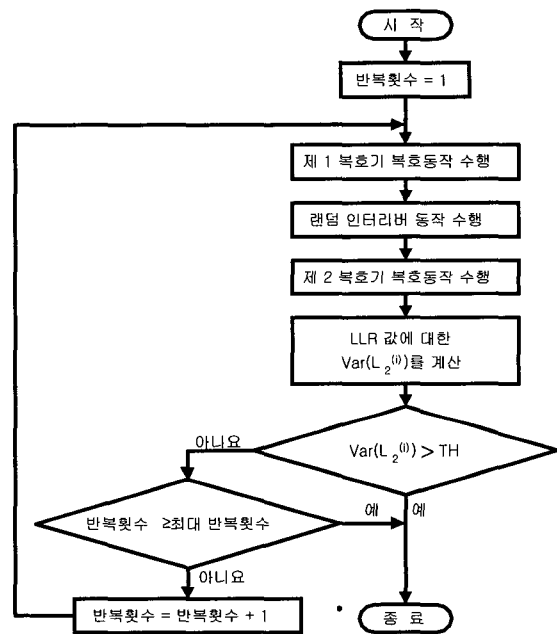


그림 3. 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 전체 흐름도

Fig. 3. Flow chart of turbo decoder applying the proposed iterative decoding stop criterion algorithm.

그림 3은 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 전체 흐름도를 나타낸 것으로써 두 번째 터보복호기의 LLR 출력값에 대하여 현재 반복과정에서 식 (8)을 이용하여 계산된 분산값과 주어진 임계값을 비교하여 식 (9)를 만족할 경우에 반복복호를 중단하는 일련의 과정을 수행한다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘의 성능을 분

석하기 위하여 부호율이 1/3인 터보부호에 대해서 MAP 알고리즘을 기반으로 한 터보복호기를 MATLAB 으로 구현하여 모의실험을 수행하였으며 AWGN 채널 환경에서 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 BER 성능과 평균 반복복호 횟수 및 계산량을 비교, 분석하였다. 성능을 분석하기 위한 파라미터를 요약하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2. 성능분석을 위한 파라미터
Table.2. Parameter for performance analysis.

채널/변조방식	AWGN/BPSK
구속장(K)	K=4
구성부호(G)	$[1101, 1111]_2 = (15, 17)_8$
부호율(R)	1/3
인터리버	랜덤 인터리버
반복중단 알고리즘	CE, HDA, SCR, Proposed
프레임 크기	1024
최대반복횟수	15회
요구 BER	10^{-6}

그림 4는 AWGN 채널에서 모의실험에 사용된 터보부호의 반복 횟수를 최대 15회까지 설정하고 각 반복 횟수에 따른 BER 성능을 나타내었다.

그림 4에 나타난 BER 성능을 살펴보면 6회까지는 복호 횟수가 증가함에 따라서 BER 성능이 크게 향상되지만 그 이후의 반복 횟수에서는 BER 성능의 향상이 상대적으로 작게 나타난다. 그 이유로는 고정적인 반복 횟수에서는 반복복호가 어느 정도 진행하면 임의의 반복 후에는 부호이득이 매우 작아지기 때문이다. 대부분의 프레임에서 15회의 반복 횟수 이전에 오류가 나타나지 않거나 더 이상의 이득이 나타나지 않게 되므로 의미있는 부호이득을 얻은 뒤에는 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 반복중단 알고리즘이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능을 나타낸 것으로서 iter15는 최대 반복 횟수인 15회까지 반복복호를 수행한 경우이다. 여기서 CE 알고리즘과 SCR 알고리즘의 임계값은 0.001로 설정하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 기존 알고리즘인 CE 알고리즘이나 HDA 알고리즘 및 SCR 알고리즘은 제안된 알고리

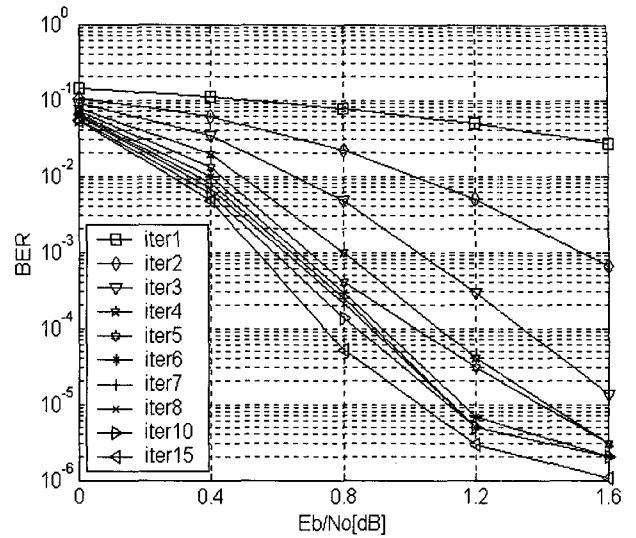


그림 4. 반복 횟수에 따른 BER 성능곡선
Fig. 4. BER performance according to iterative decoding number.

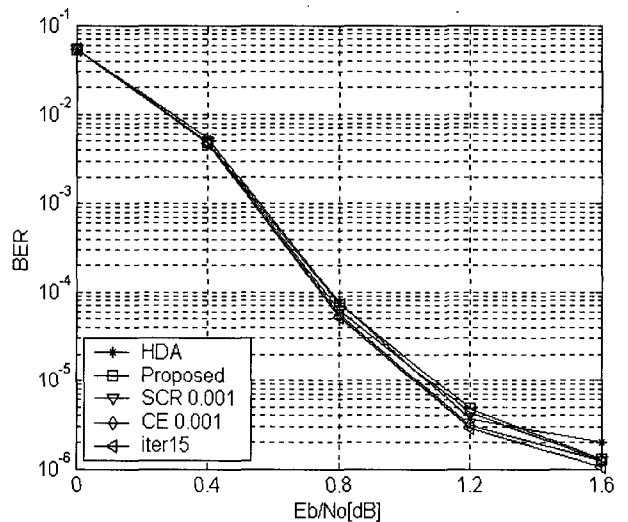


그림 5. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능곡선
Fig. 5. BER performance according to iterative decoding stop criterion algorithm.

즘과 거의 같은 BER 성능을 나타내고 있으며 최대 반복 횟수인 15회와 비교해도 BER 손실이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

표 3은 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것으로서 각각의 알고리즘은 SNR이 증가할수록 반복 횟수가 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 임의의 SNR에서 기존의 알고리즘과 비교할 때 반복 횟수의 감소폭이 가장 크게 나타났다.

모의실험 결과, 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 HDA 알고리즘이나 SCR 알고리즘과 비교하여 높

표 3. 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수의 비교

Table.3. Comparison of average iterative decoding number according to iterative decoding stop criterion algorithm.

중단조건 SNR[dB]	HDA	SCR (0.001)	CE (0.001)	Proposed (1000)
0.0	11.7693	11.6143	11.8718	11.6156
0.4	6.9368	6.8531	7.1068	6.8625
0.8	4.5425	4.4950	4.6025	4.4093
1.2	3.6468	3.5825	3.5637	3.2843
1.6	3.1706	3.1250	3.0881	2.9343

표 4. 반복중단 알고리즘에 따른 계산량의 비교
Table.4. Comparison of computation according to iterative decoding stop criterion algorithm.

반복중단 알고리즘	특 징
• CE	<ul style="list-style-type: none"> • 계산의 복잡성 및 구현의 어려움 • $(5N-1)$ 번의 실수연산이 필요 • $(N+2)$ 비트의 실수 메모리가 필요 • LLR 값과 외부정보값을 필요
• SCR	<ul style="list-style-type: none"> • 계산량과 H/W 복잡도 면에서 장점 • $(3N-1)$ 번의 정수연산이 필요 • $(N+2)$ 비트의 정수 메모리가 필요 • 외부정보값만을 필요
• HDA	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 SNR에서 반복복호 횟수가 감소 • 높은 SNR에서 성능 열화가 발생 • N 번의 2진연산이 필요 • N 비트의 메모리가 필요
• Proposed	<ul style="list-style-type: none"> • $2(N-1)$ 번의 덧셈 연산이 필요 • $(N+1)$ 번의 곱셈 연산이 필요 • 1번의 뺄셈 연산이 필요 • 2번의 나눗셈 연산이 필요 • N 비트의 실수 메모리가 필요

은 SNR에서 각각 최대 9.94%와 8.32% 정도의 감소효과를 나타냈으며 CE 알고리즘과 비교하여 약 2.16%~7.84% 정도의 감소효과를 나타내었다.

표 4는 동일한 평균 반복복호 횟수를 가정하고 반복중단 알고리즘에 따른 계산량을 비교한 것으로써 본 논문에서 제안된 알고리즘은 SCR 알고리즘과는 거의 비슷한 계산량을 가지지만 CE 알고리즘과 비교하면 약 40% 정도의 계산량 감소효과를 나타낼 수 있었다.

또한, HDA 알고리즘보다는 계산량은 증가하지만 동일한 BER 성능을 가정하면 평균 반복복호 횟수가 훨씬 감소하는 장점을 가진다.

V. 결 론

본 논문에서는 터보복호기에서의 불필요한 복호 지연시간과 계산량 및 전력소모를 줄일 수 있는 방법으로써 터보복호의 반복복호 과정에서 현재 복호된 값으로부터 충분한 반복이 이루어 졌는지를 검사하여 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 새로운 반복중단 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안된 알고리즘은 고정된 반복 횟수 이전에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 기법으로써 터보복호기의 최종 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 계산량 뿐만 아니라 평균 반복복호 횟수면에서도 기존의 알고리즘과 비교하여 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

모의실험 결과, 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 HDA 알고리즘이나 SCR 알고리즘과 비교하여 높은 SNR에서 각각 최대 9.94%와 8.32% 정도의 감소효과를 나타냈으며 CE 알고리즘과 비교하여 약 2.16%~7.84% 정도의 감소효과를 나타내었다. 또한, 동일한 평균 반복복호 횟수를 가정하고 반복중단 알고리즘에 따른 계산량을 비교하면 제안된 알고리즘은 SCR 알고리즘과는 거의 비슷한 계산량을 가지지만 CE 알고리즘과 비교하면 약 40% 정도의 계산량 감소효과를 나타내었다.

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘이 이동통신 분야에 적용될 경우에는 계산량 및 복호 지연시간의 단축으로 인하여 고속 전송 및 멀티미디어 통신 서비스를 효율적으로 지원할 수 있으며 전력소모의 감소로 인하여 시스템의 효율을 높이는 데 탁월한 효과를 거둘 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] C.Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error Correcting Coding and Decoding : Turbo Codes," Proc. of the ICC, pp. 1064-1070, May 1993.
[2] S. Pietrobon, "Implementation and Performance of a Turbo/MAP Decoder," Int. J. Satellite comm., vol. 16, pp. 23-46, Jan-Feb. 1998.

- [3] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "A Soft-input Soft-output APP Module for Iterative Decoding of Concatenated Codes," NATO under Research Grant CRG, Dec. 1995.
- [4] Small World Communications, "Iterative Decoding of Parallel Concatenated Convolutional Codes," ver. 1.4, Jan. 1999.
- [5] 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.
- [6] R. Shao, M. Fossorier, and S. Lin, "Two Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding," IEEE Trans. Comm., vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.
- [7] Soonyong Kim, Jinsu Chang, and Moonho Lee, "Simple Iterative Decoding Stop Criterion for Wireless Packet Transmission," Electronics Letters vol. 36, no. 24, Nov. 2000.

 저 자 소 개



정 대 호(정회원)

1995년 원광대학교 전자공학과
학사 졸업.

1997년 원광대학교 전자공학과
대학원 석사 졸업.

2003년 원광대학교 전자공학과
대학원 박사 졸업.

2004년~현재 원광대학교 전기전자 및
정보공학부 강의전담교수.

<주관심분야: 채널부호, 부호이론, 터보부호,
CAD & ASIC Design, SoC Design>

임 순 자(정회원)

대한전자공학회 제42권 TC편 제5호 참조

김 환 용(정회원)

대한전자공학회 제42권 TC편 제5호 참조