

터보부호의 오류확률 분산값을 이용한 효율적인 반복중단 알고리즘

정희원 정 대 호*, 심 병 섭*, 임 순 자*, 김 태 형**, 김 환 용*

An Efficient Iterative Decoding Stop Criterion Algorithm using Error Probability Variance Value of Turbo Code

Dae-ho Jeong*, Byoung-Sup Shim*, Soon-Ja Lim*, Tae-hyung Kim**, Hwan-yong Kim* *Regular Members*

요 약

터보부호는 디지털 이동통신 시스템에서 사용되는 오류정정 부호화 기법의 일종으로써 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 되고 전력소모 또한 커지게 되는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 터보부호의 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다. 제안된 반복중단 알고리즘은 고정된 반복 횟수 이전에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 기법으로써 연판정 출력값에 대한 오류확률의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 모의실험 결과, 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 HDA 알고리즘과 비교하여 약 2.25%~14.31% 정도의 감소효과를 나타냈으며 CE 알고리즘과 비교하여 약 3.79%~14.38% 정도의 감소효과를 나타내었다.

Key Words : Turbo Code, Iterative Decoding, Stop Criterion Algorithm, Variance Value

ABSTRACT

Turbo code, a kind of error correction coding technique, has been used in the field of digital mobile communication systems. And 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, computation and power consumption 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 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 error probability for the soft output value, and can largely reduce the average number of decoding iterations without BER performance degradation. As a result of simulation, the average number of decoding iterations for the proposed algorithm is reduced by about 2.25%~14.31% and 3.79~14.38% respectively compared to conventional schemes, and power consumption is saved in proportion to the number of decoding iterations.

* 원광대학교 전자공학과(hykim@wonkwang.ac.kr), ** 익산대학 전자정보과(thkim@iksan.ac.kr)

논문번호 : 040124-0317, 접수일자 : 2004년 3월 17일

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

I. 서론

디지털 이동통신 시스템은 무선채널의 특성상 데이터를 전송하는 경우 채널상에서 발생할 수 있는 페이딩, 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-2000 차세대 이동통신 시스템에서 전송속도가 32kbps 이상의 고속 데이터 전송용 채널부호의 표준으로 채택된 터보부호는 2개의 RSC(Recursive Systematic Convolutional) 부호와 인터리버를 병렬로 연결하여 부호화하며 반복복호(iterative decoding)를 통하여 복호 동작을 수행하게 된다. 이러한 터보 부호는 인터리버의 크기가 크고 반복복호가 충분히 수행되었을 때 비트 에러율 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)를 구하고 이 값을 사전확률(a priori probability) 값으로 사용하여 추정(estimate)된 정보비트를 출력하게 되며 이들간에 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 시간을 줄일 수 있는 방법으로써 현재 복호된 값으로부터 충분한 반복이 이루어 졌는지를 검사하여 추가적인 반복 과정에서 이득이 없다고 판단될 때 고정된 반복 횟수 이전에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 MAP 알고리즘을 기반으로 한 터보부호를 MATLAB Tool을 이용하여 모의실험을 수행하였으며 AWGN 채널 환경에서 기존의 알고리즘과 비교하여 BER 성능과

평균 반복복호 횟수를 비교, 분석하였다.

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.

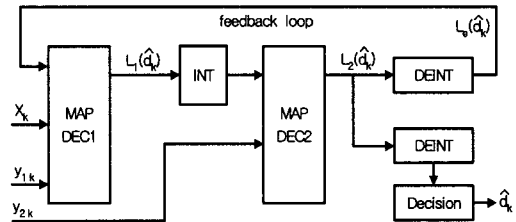


그림 1. MAP 터보복호기

터보부호의 반복복호는 복호기에서 연판정 값을 출력하므로써 현재 수행되어진 복호의 신뢰도를 판단하고 반복적으로 복호를 수행하므로써 BER 성능을 향상시키게 된다. 터보부호의 복호 과정에서 복호기의 출력값은 LLR(Log Likelihood Ratio) 값으로 표현되어 진다. 수신 신호열을 R^N 이라 할 때 정보비트 d_k 에 대한 LLR 출력값은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

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

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

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

식 (2)에서 첫 번째 항, $L_o(d_k)$ 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, $L_c(\hat{a}_k)$ 은 추정된 정보비트 d_k 에 대한 외부 정보 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 후 첫 번째 복호기와 두 번째 복호기에 대한 각각의 LLR 출력값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 전력소모 또한 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) 알고리즘과 Shao에 의해서 제안된 SCR(Sign Change Ratio)과 HDA (Hard Decision Aided) 알고리즘 등이 있다.^[5,6]

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 중단 조건을 검사하게 된다.^[5] i 번째 반복에서 교차 엔트로피 값, $T(i)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(i) = \sum_{k=1}^N \frac{|L_2^{(i)}(\hat{a}_k) - L_2^{(i-1)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i)}(\hat{a}_k)|)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $L_2^{(i)}(\hat{a}_k)$ 는 i 번째 반복에서의 두 번째 복호기의 외부정보 값을 나타내고, $L_1^{(i)}(\hat{a}_k)$ 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 상수 값으로써 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 사이의 값을 가

지며 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 개의 합으로 근사화시킬 수 있다.^[6]

$$\begin{aligned} T(i) &\approx \sum_{k \in \Lambda_1} \frac{|L_2^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i)}(\hat{a}_k)|)} + \sum_{k \in \Lambda_2} \frac{|L_2^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i)}(\hat{a}_k)|)} \\ &= T_1(i) + T_2(i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Λ_s 는 한 프레임의 모든 k 비트 중에서 $L_2^{(i-1)}(\hat{a}_k)$ 와 $L_2^{(i)}(\hat{a}_k)$ 의 부호가 변하지 않는 모든 심볼로 정의한다. 또한, 위 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.

$$T(i) \approx \sum_{k \in \Lambda_2} \frac{|L_2^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(\hat{a}_k)|)} \approx \delta_i \cdot C(i) \quad (6)$$

여기서 δ_i 는 $k \in \Lambda_2$ 에 해당되는 정보 심볼에 대해서 식 (6)의 두 번째 수식에 대한 평균값으로 정의한다. 또한, $C(i)$ 는 각 복호 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 연판정 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 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

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

HDA 알고리즘은 두 번째 복호기의 이전 복호

과정에서 얻어진 경관정 출력값들을 메모리에 저장하고 저장된 값들과 현재 출력된 경관정 값과의 2진 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 실수값을 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 2진 연산이 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.

위에서 설명한 가변적 반복중단 알고리즘의 공통점은 복호기의 출력단에서 어떤 기준값(예를들어 LLR 출력값이나 외부정보 값)을 이용하여 반복복호를 중단하는 기준으로 사용하고 있다는 것이다. 이러한 알고리즘은 한 프레임에서 반복복호를 진행할 때마다 기준값을 측정해야 하는 계산상의 복잡도를 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 지연시간을 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 연관정 출력값에 대한 오류확률의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다.

식 (1)에 정의된 터보복호기의 최종 연관정 출력값인 LLR 출력값은 정보비트 d_k 에 대한 신뢰도를 나타낸 것으로써 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 LLR 출력값에 대해서 정보비트 d_k 를 올바르게 추정할 확률 $P_r^{(i)}(\hat{d}_k)$ 을 구하여 정리하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r^{(i)}(\hat{d}_k) = \frac{\exp(L(\hat{d}_k R_k^N))}{1 + \exp(L(\hat{d}_k R_k^N))} \quad (8)$$

식 (8)로부터 정보비트 d_k 가 오류일 확률 $P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k)$ 을 유도하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k) = 1 - P_r^{(i)}(\hat{d}_k) = \frac{1}{1 + \exp(L(\hat{d}_k R_k^N))} \quad (9)$$

윗 식에 나타난 바와 같이 LLR 출력값에 대한 절대값이 클수록 추정된 정보비트 d_k 가 오류일 확률은 작아진다는 것을 알 수가 있으며 이것은 반복복호가 진행되는 동안 LLR 출력값의 절대값이 증가함에 따라서 추정된 정보비트 d_k 에 대한 오류확률 값이 더욱 작아진다는 것을 나타낸다. 그리고, 식 (9)를 이용하여 오류확률의 분산값을 구하는 수식을 유도하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k)] = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k)^2}{N} - \left\{ \frac{\sum_{k=1}^{N-1} P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k)}{N} \right\}^2 \quad (10)$$

식 (9)를 통해서 얻어지는 터보복호기의 LLR 출력값과 모든 정보비트 d_k 에 대한 추정값이 오류 일 확률값인 $P_{err}^{(i)}(\hat{d}_k)$ 값들이 임의의 반복 횟수에 따라서 어떠한 분포를 이루는지를 살펴보기 위해서 MATLAB Tool을 사용하여 그 값들을 추출하였고, 식 (10)을 이용하여 오류확률에 대한 분산값을 계산하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 파라미터 추출을 위한 E_b/N_0 는 1.0[dB]로 설정하였고, i 는 반복복호 횟수이며, $Var[P_{err}^{(i)}]$ 는 i 번째 반복복호에서 오류확률의 분산값을 나타낸다.

표 1. 반복 횟수에 따른 오류확률의 분산값

반복 횟수	오류 갯수	오류확률의 분산 $Var[P_{err}^{(i)}]$	오류 갯수	오류확률의 분산 $Var[P_{err}^{(i)}]$
1	129	1.999e-002	101	1.735e-002
2	90	1.455e-002	48	9.925e-003
3	61	1.345e-002	30	7.081e-003
4	45	1.286e-002	17	6.326e-003
5	33	9.543e-003	8	2.061e-003
6	10	4.880e-003	4	2.789e-004
7	5	1.800e-003	0	3.262e-004
8	5	5.711e-004	0	2.017e-005
9	5	3.917e-004	0	9.686e-006
10	2	3.535e-004	0	1.763e-007
11	0	6.609e-006	0	1.395e-008
12	0	2.176e-006	0	1.735e-011
13	0	1.323e-009	0	1.587e-011
14	0	1.129e-013	0	6.953e-012
15	0	1.049e-016	0	3.508e-017

표 1에서와 같이 식 (10)에서 주어진 오류확률의 분산값은 매우 작은 값을 가지며 반복복호가 진행됨에 따라서 급격히 감소함을 알 수가 있다. 따라서, 오류확률의 분산값이 임의의 임계값 (TH : threshold) 이하일 때 추가적인 반복복호가 부호이득에 미치는 영향은 매우 작게 됨을 알 수가 있다. 이에 근거하여 식 (10)을 이용하여 반복복호를 중단시키기 위한

중단조건을 제시하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Var[P_{err}^{(i)}] \leq TH \cdot Var[P_{err}^{(1)}] \quad (11)$$

여기서 i 는 반복복호 횟수이며, TH 는 반복복호를 중단하기 위한 임계값이고, $Var[P_{err}^{(1)}]$ 은 첫 번째 반복복호에서 오류확률의 분산값을 나타낸다.

본 논문에서 제안된 오류확률의 분산값을 이용한 터보부호의 효율적인 반복중단 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 터보 복호기의 LLR 출력값에 대한 신뢰도를 측정하는 척도로써 오류확률의 분산값을 이용한다. 따라서 현재 계산된 오류확률의 분산값과 첫 번째 반복복호 과정에서 계산된 오류확률의 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 0.01~0.0001의 값을 갖는다. 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘에서 적용할 임계값은 여러 번의 모의실험을 통해서 0.0001로 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 오류확률 값과 분산값을 계산한다. 계산된 오류확률의 분산값이 기 설정된 임계값과 비교하여 클 경우에 반복복호 중단신호를 발생시키고 반복복호를 중단하도록 설계하였다.

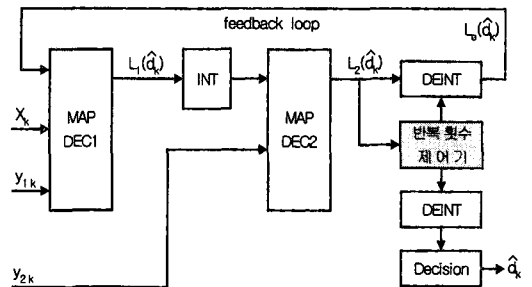


그림 2. 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 구조

본 논문에서 설계된 반복 횟수 제어기의 내부 구성 블럭으로는 연판정 값 저장부, 분산값 계산부,

반복 횟수 제어부로 구성되며 반복 횟수 제어부는 3개의 하부 기능 블럭인 임계값 저장부, 비교부, 반복중단 신호 출력부로 구성할 수 있다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 전체 흐름도를 나타낸 것으로서 두 번째 터보복호기의 LLR 출력값을 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 각각 오류확률 값과 이에 대한 분산값을 구한 후에 현재 반복 과정에서 계산된 오류확률의 분산값과 첫 번째 반복 과정에서 계산된 오류확률의 분산값을 주어진 임계값에 의해서 비교하여 식 (11)을 만족할 경우에 반복복호를 중단하도록 하는 일련의 과정을 수행한다.

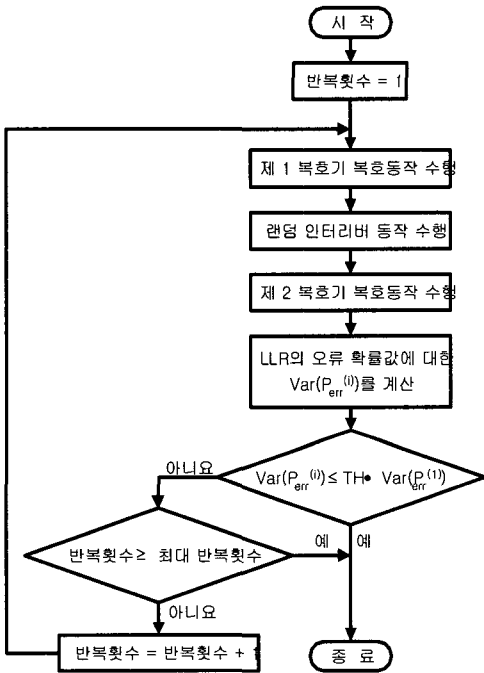


그림 3. 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보복호기의 전체 흐름도

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 부호율이 1/3인 터보부호에 대해서 MAP 알고리즘을 기반으로 한 터보복호기를 MATLAB으로 구현하여 모의실험을 수행하였으며 AWGN 채널 환경에서 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 BER 성능과 평균 반복복호 횟수를 비교 분석하였다. 성능을 분석하기 위한 파라미터를 요약하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2 성능 분석을 위한 파라미터

채널/변조방식	AWGN/BPSK
구속장(K)	K=4
구성부호(G)	[1101, 1111] ₂ =(15,17) ₈
부호율(R)	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 8회까지는 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 부호이익이 매우 작아지기 때문이다.

대부분의 프레임에서 15회의 반복 횟수 이전에 오류가 나타나지 않거나 더 이상의 이익이 나타나지 않게 되므로 의미있는 부호이익을 얻은 뒤에는 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 반복중단 알고리즘이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

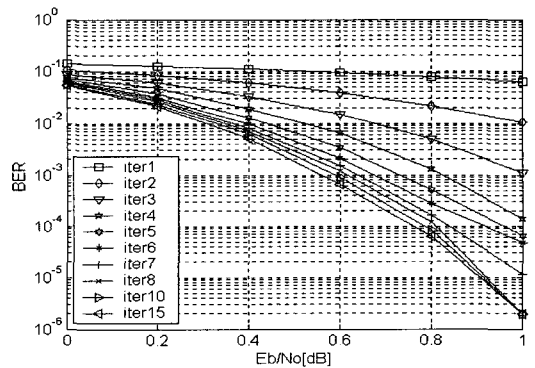


그림 4. 반복 횟수에 따른 BER 성능곡선

그림 5는 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능을 나타낸 것으로서 iter15는 최대 반복 횟수인 15회까

지 반복복호를 수행한 경우이다. 여기서 CE 알고리즘과 SCR 알고리즘의 임계값은 0.001로 설정하였다.

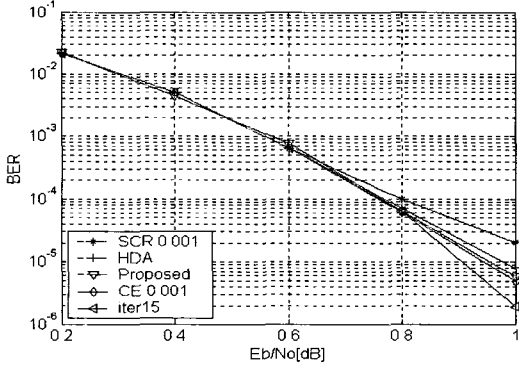


그림 5. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능곡선

그림 5에 나타난 바와 같이 기존 알고리즘인 CE 알고리즘이나 HDA 알고리즘은 제안된 알고리즘과 거의 같은 BER 성능을 나타내고 있으며 최대 반복 횟수인 15회와 비교해도 BER 손실이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 SCR 알고리즘은 제안된 알고리즘과 비교하여 상대적으로 높은 SNR에서는 BER 성능면에서 손실이 발생하였다.

표 3은 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것으로써 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.

표 3. 반복 횟수에 따른 오류확률의 분산값

SNR [dB]	고정 반복	SCR (0.001)	HDA	CE (0.001)	Proposed (0.0001)
0.2	15회	9.3310	9.4220	9.5730	9.2100
0.4	15회	6.8710	6.9360	7.1140	6.4270
0.6	15회	5.3050	5.3820	5.5140	4.8930
0.8	15회	4.4720	4.5140	4.5810	3.9900
1.0	15회	3.9640	4.0170	4.0200	3.4420

표 4는 동일한 평균 반복복호 횟수를 가정하고 반복중단 알고리즘에 따른 계산량을 비교한 것으로써 본 논문에서 제안된 알고리즘은 지수 연산을 수

표 4. 반복중단 알고리즘에 따른 계산량의 비교

반복중단 알고리즘	특징
• CE	<ul style="list-style-type: none"> 계산의 복잡성 및 구현의 어려움 (5N-1) 번의 실수 연산이 필요 (N+2) 비트의 실수 메모리가 필요 LLR 값과 외부정보값을 필요
• SCR	<ul style="list-style-type: none"> 계산량과 H/W 복잡도에서 장점 (3N-1) 번의 정수 연산이 필요 (N+2) 비트의 정수 메모리가 필요 외부정보값만을 필요
• HDA	<ul style="list-style-type: none"> 낮은 SNR에서 반복 횟수가 감소 높은 SNR에서 성능 열화가 발생 N 번의 2진 연산이 필요 N 비트의 메모리가 필요
• Proposed	<ul style="list-style-type: none"> (5N+2) 번의 실수 연산이 필요 N 비트의 실수 메모리가 필요 N 번의 지수 연산이 필요

행해야 하므로 CE 알고리즘과 거의 비슷한 계산량을 가지며 SCR 알고리즘이나 HDA 알고리즘보다는 계산량은 증가하지만 동일한 BER 성능에서 평균 반복복호 횟수가 훨씬 감소하는 장점을 가진다.

V. 결론

본 논문에서는 터보부호의 반복복호 과정에서 현재 복호된 값으로부터 충분한 반복이 이루어졌는지를 검사하여 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 연판정 출력값에 대한 오류확률의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수면에서 기존의 알고리즘과 비교하여 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

모의실험 결과, 제안된 반복중단 알고리즘은 SCR 알고리즘과 비교하여 높은 SNR에서 상대적으로 우수한 BER 성능을 나타내었다. 또한, 동일한 BER 성능에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 HDA 알고리즘과 비교하여 약 2.25%~14.31% 정도의 감소효과를 나타냈으며 CE 알고리즘과 비교하여 약 3.79%~14.38% 정도의 감소효과를 나타내었다.

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘이 이동통신 분야에 적용될 경우에 복호 지연시간의 단축으로 인하여 고속 전송 및 멀티미디어 통신 서비스를

효율적으로 지원 할 수 있으며 전력소모의 감소로 인하여 시스템의 효율을 높이는데 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 Commun., 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, "Tow Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding," IEEE Trans. Comm., vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.

정 대 호 (Dae-ho Jeong) 정회원



1995년 2월: 원광대학교 전자공학과 졸업
 1997년 2월: 원광대학교 전자공학과 공학석사
 2003년 8월: 원광대학교 전자공학과 공학박사
 2004년 3월~현재: 원광대학교

강의전담교수

<주관심 분야> 채널부호, 이동통신 시스템, CAD & ASIC Design, SoC Design

심 병 섭 (Byoung-Sup Shim) 정회원



1998년 2월: 원광대학교 전자공학과 졸업
 2000년 2월: 원광대학교 전자공학과 공학석사
 2000년 3월~현재: 원광대학교 전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 이동통신, 부호이론

임 순 자 (Soon-Ja Lim) 정회원

한국통신학회 논문지 제29권 제5A호 참조
 현재: 원광대학교 전자공학과 BK 계약교수
 <주관심 분야> 이동통신, 부호이론

김 태 형 (Tae-Hyung Kim) 정회원



1989년 2월: 원광대학교 전자공학과 졸업
 1991년 2월: 원광대학교 전자공학과 공학석사
 2002년 8월: 원광대학교 전자공학과 공학박사
 1995년 3월~현재: 익산대학 전

자정보과 교수

<주관심 분야> 이동통신, ASIC, 음향시스템,

김 환 용 (Hwan-Yong Kim) 정회원

한국통신학회 논문지 제29권 제5A호 참조
 현재: 원광대학교 전자공학과 교수

<주관심 분야> 채널부호, CAD & ASIC Design, VLSI 구현, 디지털 신호처리