

논문 2006-43TC-9-18

터보부호에서 LLR 분산값을 이용한 반복중단 알고리즘 구현

(Implementation of Stopping Criterion Algorithm using Variance Values of LLR in Turbo Code)

정 대 호*, 김 환 용**

(Dae Ho Jeong and Hwan Yong Kim)

요 약

터보부호는 디지털 이동통신 시스템에서 사용되는 오류정정 부호화 기법의 일종으로서 반복복호가 진행됨에 따라 AWGN 채널 환경에서 우수한 BER 성능을 나타낸다. 그러나 다양한 채널 환경에서 반복 횟수가 증가하면 복호하는데 필요한 지연시간과 계산량이 증가하는 단점을 가진다. 이를 해결하기 위해서는 적절한 반복 후에 반복복호를 효율적으로 중단시킬 수 있는 중단조건이 필요하게 된다. 본 논문에서는 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 모든 SNR 영역에서 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다. 모의실험 결과, 높은 SNR 영역에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 외부정보 값에 대한 분산값을 이용한 방법과 비교하여 약 34.66~41.33% 정도의 감소효과를 나타내었다. 낮은 SNR 영역에서 CE 알고리즘과 비교하여 약 13.93%~14.45% 정도의 감소효과를 나타내었으며, SDR 알고리즘과 비교하여 약 13.23%~14.26% 정도의 감소효과를 나타내었다.

Abstract

Turbo code, a kind of error correction coding technique, has been used in the field of digital mobile communication system. As the number of iterations increases, it can achieve remarkable BER performance over AWGN channel environment. However, if the number of iterations is increased in the several channel environments, any further iteration results in very little improvement, and requires much delay and computation in proportion to the number of iterations. To solve this problem, it is necessary to devise an efficient criterion to stop the iteration process and prevent unnecessary delay and computation. In this paper, it proposes an efficient and simple criterion for stopping the iteration process in turbo decoding. By using variance values of LLR in turbo decoder, the proposed algorithm can largely reduce the average number of iterations without BER performance degradation in all SNR regions. As a result of simulation, the average number of iterations in the upper SNR region is reduced by about 34.66%~41.33% compared to method using variance values of extrinsic information. the average number of iterations in the lower SNR region is reduced by about 13.93%~14.45% compared to CE algorithm and about 13.23%~14.26% compared to SDR algorithm.

Keywords : Turbo Code, Iterative Decoding, Stopping Criterion, Variance Values

I. 서 론

디지털 이동통신 시스템에서는 무선채널을 이용하기 때문에 음성, 영상, 데이터 등의 정보를 전송할 때 잡음,

간섭, 페이딩 등으로 인하여 비트 오류의 발생 확률이 매우 높다. 이러한 오류를 적절히 극복하여 시스템의 신뢰도를 높이기 위해서는 오류제어기법을 도입하는 것이 필수적이다. 채널의 성격에 따라 오류제어기법은 여러 가지 형태로 변형될 수 있으나 가장 기본적인 방법은 오류정정부호를 사용하는 것이다.

차세대 이동통신 시스템에서 고속의 멀티미디어 서비스를 제공하기 위한 채널부호로 언급되는 터보부호는 부호기 입력과 인터리버에 의해서 재배열된 입력을 각각 두 개의 구성부호기(constituent encoder)를 통해서

* 정회원, ** 평생회원, 원광대학교 전기전자 및 정보공학부

(Department of Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University)

※ 이 논문은 2006년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행됨.

접수일자: 2006년7월3일, 수정완료일: 2006년9월16일

부호화하여 입력정보와 다중 패리티 정보를 출력하도록 구성된다. 이러한 터보부호는 비트 에러율 관점에서 샤논 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 외부정보 값을 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 계산량과 복호 지연시간이 증가하게 되고 하드웨어 메모리 또한 커지게 되는 단점을 가진다^[2].

본 논문에서는 복호기에서의 불필요한 복호 지연시간을 줄일 수 있는 방법으로서 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR(Log Likelihood Ratio)의 분산값을 중단 조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 모든 SNR 영역에서 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 LLR의 분산값을 이용한 새로운 알고리즘은 고정된 임계값을 사용하는 기존 알고리즘과는 달리 각각의 SNR에 따라서 서로 다른 임계값을 적용함으로써 모든 SNR 영역에서 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. 터보부호의 반복중단 알고리즘

터보부호의 복호기는 복호 알고리즘에 따라서 MAP(Maximum a Posteriori) 방식의 복호기와 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm) 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 복호기(DEC1, DEC2)와 인터리버(INT), 디인터리버(DEINT) 및 경판정기(Decision)로 구성된 터보 복호기의 구조를 나타낸다.

터보부호는 복호 과정에서 반복 횟수가 증가할수록

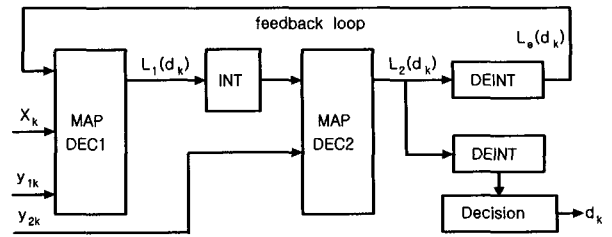


그림 1. 터보 복호기의 구조
Fig. 1. Structure of turbo decoder.

LLR 출력값에 대한 신뢰도가 증가하게 되어 BER 성능이 향상된다. 그러나 반복 횟수에 비례하여 계산량(complexity)과 그것에 의한 복호 지연시간(decoding delay time)이 증가하는 단점을 가진다.

평균적인 계산의 복잡도를 줄이는 방법 중에 하나로 반복복호의 중단 시점을 적절하게 파악하여 평균 반복복호 횟수를 줄이는 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며 몇 가지 반복중단 알고리즘들이 발표되었다^[5-8].

이러한 반복중단 알고리즘들은 상대적으로 높은 신호대 잡음비 영역에서 적은 수의 반복복호 이후에 곧바로 수렴하여 더 이상 반복복호 효과를 나타내지 않는다는 사실에 기반을 두고 있으며 반복복호 과정에서 최적의 성능을 얻은 후에는 반복복호의 중단 시점을 파악하기 위한 중단조건(stopping criterion)이 필요하게 된다.

복호기에서 미리 정해진 횟수만큼 반복복호를 수행하는 것이 아닌 가변적으로 반복복호를 중단시킬 수 있는 기존의 반복중단 알고리즘으로는 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 발표된 반복중단 알고리즘으로는 외부정보 값에 대한 분산(variance)값을 이용하는 방법^[7]과 SCR 알고리즘의 부가적인 메모리를 줄이기 위해서 제안된 SDR(Sign Difference Ratio) 알고리즘^[8] 이 있다.

CE 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 교차 엔트로피(cross entropy) 값을 계산하는 것으로서 현재 계산된 교차 엔트로피 값과 첫 번째 복호 과정에서 계산된 교차 엔트로피 값을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다. i 번째 반복에서 교차 엔트로피 값, $T(i)$ 는 식 (1)과 같다^[5].

$$T(i) = \sum_{k=1}^N \frac{|L_{e2}^{(i)}(d_k) - L_{e2}^{(i-1)}(d_k)|^2}{\exp(|L_{e2}^{(i-1/2)}(d_k)|)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $L_{e2}^{(i)}(d_k)$ 는 i 번째 반복에서 두 번째 복호기의 외부정보 값을 나타내고, $L^{(i-1/2)}(d_k)$ 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 임계값인 δ 는 상수값으로서 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 사이의 값을 가지며 일반적으로 δ 가 작은 값일수록 BER 성능의 손실없이 반복복호를 중단할 수 있다. 이러한 CE 알고리즘은 교차 엔트로피 값을 계산하기 위해서 식 (1)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 부호변화율을 계산하는 것으로서 현재 복호 과정에서 출력된 외부정보 값과 이전 복호 과정에서 출력된 외부정보 값에 대한 부호변화율을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다. 변화하는 부호의 갯수를 구하기 위해서 식 (1)을 식 (2)와 같이 두 개의 합으로 근사화 시킬 수 있다^[6].

$$T(i) \approx \sum_{k \in A_s} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(d_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(d_k)|)} + \sum_{k \in A_A} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(d_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(d_k)|)} \quad (2)$$

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

식 (2)에서 $T_1(i)$ 는 $T_2(i)$ 에 비해서 매우 작기 때문에 식 (2)를 정리하여 다시 나타내면 식 (3)과 같다.

$$T(i) \approx \sum_{k \in A_s} \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(d_k)|^2}{\exp(|L_1^{(i-1)}(d_k)|)} \approx \delta_i \cdot C(i) \quad (3)$$

식 (3)에서 δ_i 는 $k \in A \setminus A_s$ 에 해당되는 정보심볼에 대해서 평균값으로 정의할 수 있다. 또한, $C(i)$ 는 각 반복복호 과정에서 출력되는 외부정보 값에 대하여 부호가 변화하는 갯수를 나타내는 것으로서 $C(i)$ 의 범위가 $C(i) \leq (0.005 \sim 0.03) \cdot N$ 을 만족할 경우에 반복복호를 중단하게 된다.

HDA 알고리즘은 각 반복복호 과정에서 복호기의 최종 출력값인 연판정값을 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 과정에

서 출력된 경판정 출력값의 부호를 비교하여 반복복호를 중단하는 것으로서 중단조건은 식 (4)와 같다^[6].

$$\text{sign}(L_2^{(i)}(d_k)) = \text{sign}(L_2^{(i-1)}(d_k)) \quad (4)$$

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 반복복호를 중단하게 된다.

외부정보 값에 대한 분산값을 이용하는 방법은 현재 복호 과정에서 최종 터보 복호기의 외부정보 값에 대한 분산값을 구한 후에 그 값을 임의의 임계값과 비교하여 반복복호를 중단하는 것으로서 중단조건은 식 (5)와 같다^[7].

$$\text{Var}(L_{e2}^{(i)}(d_k)) > K \cdot \text{Var}(L_{e2}^{(1)}(d_k)) \quad (5)$$

식 (5)에서 K 는 반복복호를 중단시키기 위한 임계값으로서 8~12 사이의 값을 가진다. $\text{Var}(L_{e2}^{(1)}(d_k))$ 는 두 번째 복호기의 첫 번째 반복에서의 외부정보의 분산값을 나타내며, $\text{Var}(L_{e2}^{(i)}(d_k))$ 는 두 번째 복호기의 i 번째 반복에서의 외부정보의 분산값을 나타낸다.

SDR 알고리즘은 이전 복호 과정에서 출력된 외부정보 값을 저장하는데 필요한 부가적인 메모리를 가지는 SCR 알고리즘의 단점을 개선하기 위해서 제안된 알고리즘이다. 이러한 SDR 알고리즘은 현재 복호 과정에서 최종 터보 복호기의 사전정보 값인 $L_{e2}^{(i)}(d_k)$ 와 외부정보 값인 $L_{e2}^{(i)}(d_k)$ 의 부호가 변화하는 갯수를 비교하여 복호를 중단하는 것으로 중단조건은 식 (6)과 같다^[8].

$$D^{(i)} = \begin{cases} \geq p \times N, & \text{continue the iteration} \\ < p \times N, & \text{stop the iteration} \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 N 은 프레임 크기를 나타내며, p 는 최종 터보 복호기의 사전정보 값과 외부정보 값의 부호변화율을 의미한다. 여기서, 반복복호를 중단하기 위한 임계값인 p 는 $0.001 \leq p \leq 0.01$ 사이의 값을 가진다.

일반적으로 p 가 작은 값일수록 BER 성능은 좋아지지만 그에 따른 평균 반복복호 횟수가 증가하는 단점을 가지며 프레임 크기가 증가하면 식 (6)에 나타난 부호변화율이 증가하게 되고, 임의의 프레임 크기에 대해서 SNR이 높아질수록 p 는 작아져야만 한다.

III. 제안된 반복중단 알고리즘

터보부호가 처음 발표되었을 때는 하드웨어 성능보다는 부호화 이론에서의 오류정정 능력 및 BER 성능에 초점을 맞추었기 때문에 정해진 반복복호 횟수만큼 복호 과정을 수행하였다. 그러나 휴대용 이동통신 기기의 발달과 보급의 확대에 의해 하드웨어의 메모리 감소와 계산량 및 복호 지연시간 감소를 위한 연구가 요구되고 있다.

최근에 발표된 외부정보 값에 대한 분산값을 이용하는 방법은 낮은 SNR 영역에서는 비교적 반복 횟수가 감소하는 장점을 가지지만 높은 SNR 영역에서는 상대적으로 반복 횟수가 증가하는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 계산량과 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안한다.

일반적으로 반복복호는 프레임 단위로 수행이 되며 프레임당 반복복호를 수행할 경우 복호 상태는 다음과 같은 세 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

(1) 정정가능오류(correctable error)

: 수신된 하나의 프레임이 반복복호가 진행됨에 따라 특정한 하나의 올바른 부호어로 수렴하게 되고 더 이상의 반복복호를 수행하더라도 복호 결과가 변하지 않는다. 이러한 경우에 LLR의 분산값은 반복 횟수가 증가함에 따라서 점점 증가하게 된다.

(2) 검출불가능오류(undetected error)

: 수신된 하나의 프레임이 반복복호가 진행됨에 따라 특정한 하나의 올바른 부호어로 수렴하지만 올바른 부호어에 오류가 발생되어 전이된 부호어로 더 이상의 반복복호를 수행하더라도 이러한 오류는 정정할 수 없다. 또한, 오류의 양과 위치는 반복복호에 따라 일정하게 되며 채널상에 과도한 오류로 인해서 발생하게 된다. 이러한 경우에도 LLR의 분산값은 반복 횟수가 증가함에 따라서 점점 증가하여 정정가능오류와 구분이 불가능하게 된다.

(3) 검출가능오류(detectable error)

: 수신된 하나의 프레임이 반복복호가 진행됨에 따라 특정한 하나의 올바른 부호어로 수렴하지 않고 계속 여러 개의 부호어 사이를 천이한다. 따라서 이러한 복호

결과에는 비교적 많은 양의 오류가 발생하고 더 이상의 반복복호를 수행하더라도 오류의 양이 크게 줄어들지 않고 오류의 위치가 계속 변화하게 된다. 이러한 오류도 또한 채널상에 과도한 오류로 인해서 발생하게 되며 이러한 경우에 LLR의 분산값은 아주 작은 값을 가지면서 반복 횟수가 증가하더라도 거의 증가하지 않게 되어 정정가능오류 및 검출불가능오류와는 구분이 가능하게 된다.

위의 세 가지 경우 중에서 (2)와 (3)의 경우에는 반복 횟수를 증가시키더라도 BER 성능의 향상에는 도움이 되지 않는다. (1)의 경우에는 BER 성능은 향상되지만 LLR의 분산값이 임의의 일정한 값으로 수렴할 때까지 반복 횟수를 증가시켜야만 오류를 정정할 수 있다.

그러나 반복 횟수를 증가시킬수록 반복 횟수에 따른 터보부호에 대한 복호 성능의 향상 정도는 작아지게 되고 반복복호에 따른 계산량은 반복 횟수에 따라 비례적으로 증가하기 때문에 적절하게 반복 횟수를 결정하여야 한다. 또한, 모든 입력 프레임에 대해서 동일한 횟수의 반복복호를 수행하는 대신 필요한 횟수만큼 반복복호를 수행하기 위해서는 터보 복호기의 입력 비트들과 출력 비트들로부터 적절한 반복 횟수를 추정해야 한다.

따라서 본 논문에서는 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR의 분산값으로부터 어떠한 임계값 이상의 신뢰도를 가지고 일정한 부호어로 수렴하는 블록들에 대해서는 추가적인 반복복호가 복호 결과에 미치는 영향이 거의 없을 것으로 판단하여 더 이상의 반복을 중단시키는 중단조건을 고려할 수 있다.

터보부호의 복호 과정에서 터보 복호기의 최종 연판정 출력값은 LLR 값으로 표현되어 진다. 수신 신호열을 R_1^N 이라할 때 정보비트 d_k 에 대한 LLR 출력값은 식 (7)과 같다.

$$L(d_k|x_k) = \log \left(\frac{P(d_k = 1 | x_k)}{P(d_k = 0 | x_k)} \right) \quad (7)$$

식 (7)에 정의된 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR 값은 정보비트 d_k 에 대한 신뢰도를 나타내며 반복복호시 성능 향상에 중요한 역할을 담당한다.

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.

이러한 LLR 출력값은 식 (8)과 같이 세 가지 항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$L(d_k) = L_a(d_k) + L_c x_k + L_e(d_k) \quad (8)$$

식 (8)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, $L_e(d_k)$ 는 정보비트 d_k 에 대한 외부정보 값이다.

식 (8)에 나타난 터보 복호기의 최종 연관정 출력값인 LLR 값에 대하여 분산값을 구하는 수식을 유도하면 식 (9)와 같다.

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

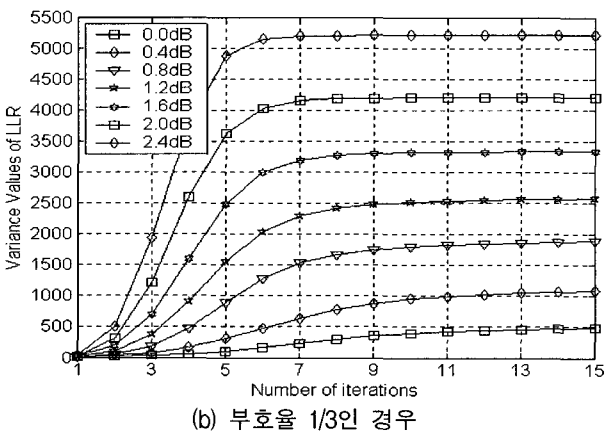
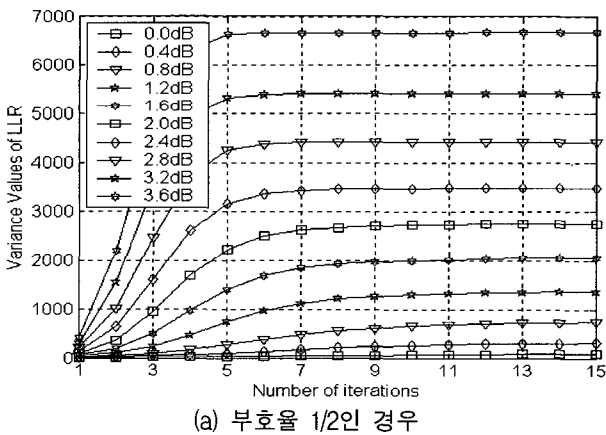


그림 2. 각 반복 횟수에 따른 LLR의 분산값
Fig. 2. Variance values of LLR according to each number of iterations.

식 (9)의 LLR 값에 대한 분산값은 그림 2에 나타난 바와 같이 반복 횟수가 증가함에 따라서 일정한 값으로 수렴하게 되며 높은 SNR 영역에서는 그 수렴 속도가 더욱 빨라짐을 알 수가 있다.

반복복호 과정에서 정보 프레임의 LLR 분산값이 일정한 값으로 수렴한다고 판단되면 반복복호를 중단하고 그렇지 않으면 반복복호를 계속 수행하여 오류를 정정하게 된다. 이를 위해서 먼저, 각 반복복호시에 LLR 분산값에 대해서 수렴영역과 비수렴영역을 정의해야 하며 이에 따라 터보부호의 반복복호를 중단하기 위한 정보 프레임의 수렴 여부를 결정해야 한다. 본 논문에서는 터보 복호기의 최종 연관정 출력값인 LLR의 분산값을 이용하여 정보 프레임의 수렴 여부를 결정하고자 한다.

식 (8)을 통해서 얻어지는 터보 복호기의 최종 연관정 출력값 $L_2^{(i)}(d_k)$ 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 (9)를 이용하여 터보 복호기의 LLR 값에 대

표 1. 각 반복 횟수에 따른 터보 복호기의 출력값
Table.1. Output values of turbo decoder according to each number of iterations.

반복 횟수	오류 갯수	L_{a2}	L_{c2}	L_{e2}	$L_2^{(i)}(d_k)$	$Var[L_2^{(i)}]$
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

한 분산값을 계산하면 표 1과 같다.

여기서, 파라미터 추출을 위한 E_b/N_0 값은 1.2[dB]로 설정하였고, i 는 반복복호 횟수이며, $Var[L_2^{(i)}]$ 는 i 번째 반복복호에서 LLR 값에 대한 분산값을 나타낸다.

표 1에 나타난 바와 같이 LLR 값에 대한 분산값이 증가하면 BER 성능도 향상된다. 그러나 임의의 반복 횟수에서는 비트 오류가 더 이상 발생하지 않으며 더 이상의 반복복호를 수행하여도 부호이득(coding gain)을 얻을 수 없음을 알 수가 있다. 또한 임의의 반복 횟수에서 LLR 값에 대한 분산값이 임의의 임계값보다도 더 큰 값에 도달하게 되면 LLR 값에 대한 분산값은 어떤 값으로 수렴하고 있음을 알 수가 있다.

따라서, 식 (9)를 이용하여 반복복호를 중단시키기 위한 중단조건을 제시하면 식 (10)과 같다.

$$Var[L_2^{(i)}] > TH \tag{10}$$

여기서, i 는 반복복호 횟수이며 $Var[L_2^{(i)}]$ 는 i 번째 반복복호에서 터보 복호기의 최종 출력값인 LLR의 분산값을 나타낸다. 또한, TH 는 터보부호의 복호 과정에서 반복복호를 효율적으로 중단시키기 위한 임계값으로서 시스템의 성능에 최대한 영향을 미치지 않도록 적절하게 설정해 주어야 한다.

적절한 임계값을 설정하기 위해서 그림 2에 나타나 있는 LLR의 분산값을 살펴보면 LLR의 분산값은 반복복호가 진행됨에 따라서 임의의 일정한 값으로 수렴하는 특성과 동시에 SNR 값이 증가함에 따라서 수렴하는 값 또한 서로 다른 값을 가지면서 증가하는 특성을 가지고 있음을 알 수가 있다. 결론적으로, 식 (10)에서 LLR의 분산값이 가지고 있는 이러한 특성을 고려하면 본 논문에서 적용할 임계값은 각각의 SNR 값에 따라서 서로 다른 임계값을 갖도록 설정할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보 복호기의 구조를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 반복 횟수 제어기는 터보 복호기의 LLR 계산부에서 출력된 LLR 값을 입력으로 받아서 메모리에 저장한 후에 LLR 값에 대한 분산값을 계산한다. 계산된 분산값이 각각의 SNR 값에 따라서 서로 다르게 설정된 임계값과 비교하여 클 경우에 반복복호 중단신호를 발생시키고 반복복호를 중단하도록 구현하였다.

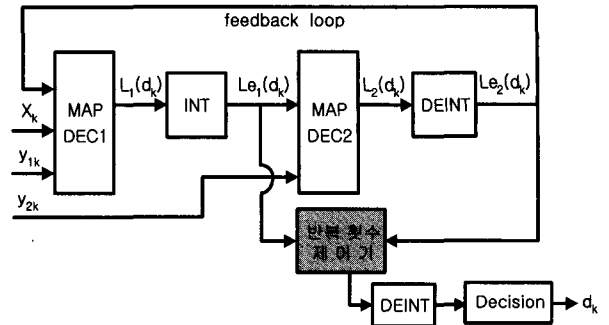


그림 3. 제안된 반복중단 알고리즘을 적용한 터보 복호기의 구조

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

표 2. 성능분석을 위한 파라미터

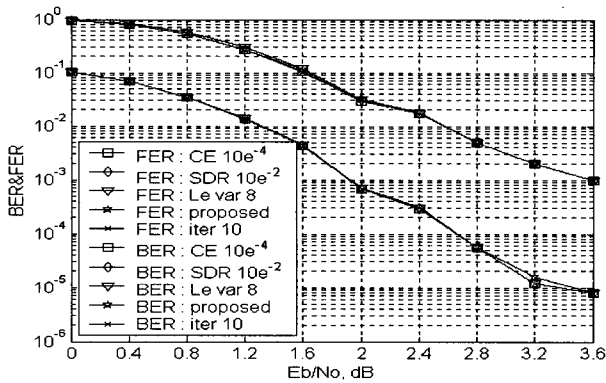
Table 2. Parameter for performance analysis.

채널/변조방식	AWGN/BPSK
구속장(K)	3
구성부호(g_1, g_2) ₈	(7, 5) ₈
부호율(R)	1/2, 1/3
인터리버	랜덤 인터리버
프레임 크기	256
최대반복횟수	10회
요구 BER	10^{-6}

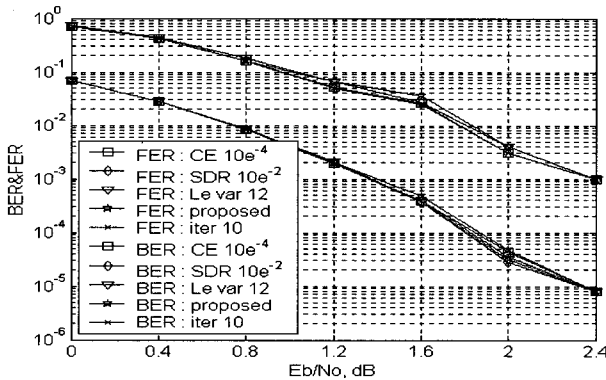
본 논문에서 구현된 반복 횟수 제어기의 내부 구성 블록으로는 연관성 출력값 저장부, 분산값 계산부, 반복 횟수 제어부로 구성되며 반복 횟수 제어부는 3개의 하부 기능 블록인 임계값 저장부, 비교부, 반복복호 중단 신호 출력부로 구성하였다.

제안된 반복중단 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 본 논문에서는 MAP 알고리즘을 기반으로 한 터보 복호기를 MATLAB 언어로 구현하여 모의실험을 수행하였으며 AWGN 채널환경에서 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 BER 성능과 평균 반복복호 횟수를 비교, 분석하였다. 성능을 분석하기 위한 파라미터를 요약하면 표 2와 같다.

그림 4는 AWGN 채널에서 모의실험에 사용된 각 반복중단 알고리즘에 따른 FER 및 BER 성능곡선을 나타낸 것이다. 그림 4에서 iter 10은 최대 반복 횟수인 10회 까지 반복복호를 수행한 경우이다. 여기서, CE 알고리즘과 SDR 알고리즘의 임계값은 각각 10^{-4} 과 10^{-2} 으로 설정하였고, 외부정보 값에 대한 분산값을 이용한



(a) 부호율 1/2 인 경우



(b) 부호율 1/3인 경우

그림 4. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능곡선

Fig. 4. BER performance according to iterative decoding stop criterion algorithm.

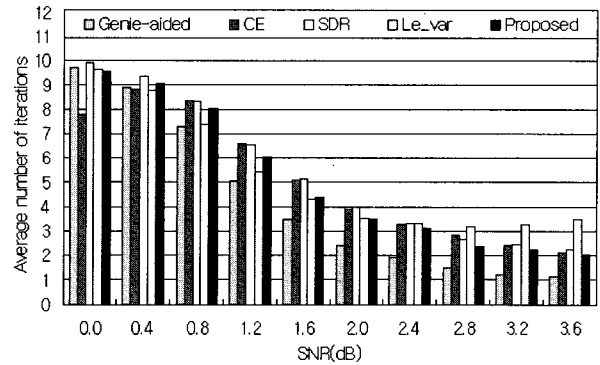
방법의 임계값은 부호율에 따라서 각각 8과 12로 설정하였다.

본 논문에서 제안된 알고리즘은 고정된 임계값을 사용하는 기존 알고리즘과는 달리 각각의 SNR에 따라서 서로 다른 임계값을 적용하였다.

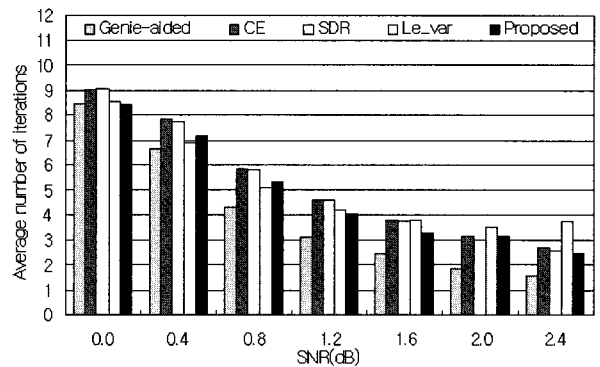
그림 4에 나타난 바와 같이 제안된 알고리즘에 대한 FER 및 BER 성능은 기존 알고리즘과 비교하여 동일하거나 약간 우수한 성능을 나타내고 있으며 최대 반복횟수인 10회와 비교해도 FER 및 BER 손실이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

그림 5는 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것이다. 그림 5에서 Genie-aided 기법은 모든 정보비트를 알고 있다는 가정하에서 각각의 복호 과정마다 정보 프레임 내에서 발생하는 오류를 관찰하여 오류가 발생하지 않으면 즉시 반복복호를 중단하는 기법으로서 정보 프레임 내에서 모든 오류가 정정되는 시점에서의 평균 반복복호 횟수를 나타낸다^[8].

그림 5에 나타난 바와 같이 SDR 알고리즘은 낮은 SNR 영역에서 초기 반복 횟수동안에 사전정보 값의 부



(a) 부호율 1/2 인 경우



(b) 부호율 1/3 인 경우

그림 5. 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수의 비교

Fig. 5. Comparison of average number of iterations according to iterative decoding stop criterion algorithm.

호와 외부정보 값의 부호가 불일치할 확률이 매우 높기 때문에 낮은 SNR 영역에서 반복복호를 중단하기 위한 중단조건인 부호변화율이 증가하게 되므로 상대적으로 반복 횟수가 증가하는 단점을 가진다. 또한 외부정보 값에 대한 분산값을 이용한 방법은 높은 SNR 영역에서 평균 반복복호 횟수가 증가하게 되는 단점을 가진다.

높은 SNR 영역에서 상대적으로 반복횟수가 증가하는 가장 큰 이유는 반복 횟수와 SNR 값이 증가할수록 반복복호를 중단하기 위한 중단조건인 외부정보 값에 대한 분산값이 서로 다른 값을 가지면서 증가하는 특성을 가지고 있기 때문이다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 부호율에 관계없이 모든 SNR 영역에서 기존 알고리즘과 비교할 때 평균 반복복호 횟수의 감소폭이 가장 크게 나타났으며 Genie-aided 기법에 가장 근접하는 우수한 성능을 나타내었다.

모의실험 결과, 높은 SNR 영역에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 외부정보 값에 대한 분산값을

이용한 방법과 비교하여 부호율 1/2인 경우에 최대 41.33% 정도의 감소효과를 나타냈으며 부호율 1/3인 경우에 최대 34.66% 정도의 감소효과를 나타내었다.

낮은 SNR 영역에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 CE 알고리즘이나 SDR 알고리즘과 비교하여 부호율 1/2인 경우에 각각 최대 13.93%와 14.26% 정도의 감소효과를 나타냈으며 부호율 1/3인 경우에 각각 최대 14.45%와 13.23% 정도의 감소효과를 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 터보 복호기의 최종 연판정 출력값인 LLR의 분산값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 효율적인 반복중단 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안된 LLR의 분산값을 이용한 새로운 알고리즘은 고정된 임계값을 사용하는 기존 알고리즘과는 달리 각각의 SNR에 따라서 서로 다른 임계값을 적용하여 모든 SNR 영역에서 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있음을 확인하였다.

모의실험 결과, 높은 SNR 영역에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 외부정보 값에 대한 분산값을 이용한 방법과 비교하여 부호율 1/2인 경우에 최대 41.33% 정도의 감소효과를 나타냈으며 부호율 1/3인 경우에 최대 34.66% 정도의 감소효과를 나타내었다.

낮은 SNR 영역에서 제안된 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 CE 알고리즘이나 SDR 알고리즘과 비교하여 부호율 1/2인 경우에 각각 최대 13.93%와 14.26% 정도의 감소효과를 나타냈으며 부호율 1/3인 경우에 각각 최대 14.45%와 13.23% 정도의 감소효과를 나타내었다.

본 논문에서 제안된 반복중단 알고리즘이 이동통신 분야에 적용될 경우에는 복호 지연시간의 단축으로 인하여 고속 전송 및 멀티미디어 통신 서비스를 효율적으로 지원할 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 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] B. H. Kim and H. S. Lee, "Reduction of the Number of Iterations in Turbo Decoding using Extrinsic Information," IEEE TENCON, 1999.

[8] Y. Wu, B. D. Woerner and W. J. Ebel, "A Simple Stopping Criterion for Turbo Decoding," IEEE Communications letters, vol. 4, no. 8, pp. 258-260, Aug. 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>

김 환 용(평생회원)

대한전자공학회 제43권 TC편 제7호 참조