

논문 2005-42TC-5-6

LLR 차의 절대 평균값을 이용한 터보부호의 새로운 반복중단 알고리즘

(New stop criterion using the absolute mean value
of LLR difference for Turbo Codes)

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

(ByoungSup Shim, Wanbum Lee, DaeHo Jeong, SoonJa Lim, TaeHyung Kim, and HwanYong Kim)

요 약

터보부호는 반복적인 복호 알고리즘을 사용함으로써 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN) 채널 환경에서 반복복호가 진행됨에 따라 BER 성능이 샤논 한계에 가까운 성능을 보이는 오류정정 방식으로 제안되었다. 그러나 터보부호의 복호과정에서 반복 횟수가 증가하게 되면 BER 성능은 향상되지만 다양한 채널환경에서 SNR이 증가할 때 무의미한 반복이 이루어진다. 그러므로 복호 지연이 증가하고 실시간 처리가 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 적절한 반복 후 중단시킬 수 있는 새로운 알고리즘이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 복호기의 연산량 출력인 LLR 차의 절대 평균값을 이용하여 BER의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 감소시킬 수 있는 새로운 반복중단 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에 대한 모의실험은 MATLAB Tool을 이용하여 수행하였다. 실험 결과, 반복중단에 의한 BER 성능은 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘 모두 최대 반복 횟수의 경우와 거의 차이가 없었다. 하지만 평균 반복복호 횟수는 기존의 반복중단 알고리즘에 비해서 효과적으로 감소시킬 수 있었다.

Abstract

It is well known the fact that turbo codes has better performance as the number of iteration and the interleaver size increases in the AWGN channel environment. However, as the number of iteration and the interleaver size are increased, it is required much delay and computation for iterative decoding. Therefore, it is important to devise an efficient criterion to stop the iteration process and prevent unnecessary computations and decoding delay. In this paper, it proposes the efficient iterative decoding stop criterion using the absolute mean value of LLR difference. It is verifying that the proposal iterative decoding stop criterion can be reduced the average iterative decoding number compared to conventional schemes with a negligible degradation of the error performance.

Keywords : Turbo Codes, Iterative decode, Stop criterion, Log-MAP

I. 서 론

디지털 이동통신 시스템은 무선채널을 이용하기 때문에 비트 오류가 발생할 확률이 매우 높다. 이러한 오류를 극복하여 시스템의 신뢰도를 높이기 위해서는 오류제어 기법을 도입하는 것이 필수적이다. 채널의 성격에 따라 오류제어 기법은 여러 가지 형태로 변형될 수 있으나 기본적인 방법은 오류정정 부호를 사용하는 것이다. IMT-2000을 비롯한 차세대 이동통신 시스템에서는

* 정회원 원광대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering,
Wonkwang University)

** 정회원, 국립익산대학 전자정보과
(Department of Electronic & Information,
Iksan National College)

※ 본 연구는 산업자원부 지혁혁신 인력양성사업의 연구 및 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00330-0) 결과로 수행되었음.

접수일자: 2005년2월23일, 수정완료일: 2005년5월7일

고속 데이터 처리의 신뢰도를 높이기 위해 강력한 오류 정정 능력을 갖는 채널부호방식을 요구하고 있다.

1993년 Berrou 등에 의해 제안된 터보부호는 부호기 입력과 인터리버에 의해 재배열된 입력을 각각 두 개의 구성부호기(Constituent Encoder)를 통해 부호화하여, 입력정보와 다중패리티 정보를 출력하도록 구성된다. 이러한 터보부호는 구성 부호기 사이의 인터리버의 크기를 증가시킴에 따라 사는 한계에 근접하는 우수한 오류정정 능력을 가지는 것으로 알려져 있다^[1].

터보부호의 복호기는 각 구성부호기에 대응하는 SISO(Soft Input/Soft Output) 복호기와 경관정 블록으로 구성된다. SISO 알고리즘으로는 MAP(Maximum A Posteriori), Log-MAP, max-Log-MAP 및 비터비 복호기를 변형시킨 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm) 등이 알려져 있다^{[2][3]}. 반복복호(iterative decoding)는 하나의 SISO 복호기에 의해 생성되는 연관정 값을 다른 SISO 복호기에 넘겨주어 수행한다. 반복복호가 진행됨에 따라 BER 성능은 개선된다. 하지만 이러한 반복복호 방식은 반복복호 횟수가 증가함에 따라 복호지연과 계산량이 추가적으로 증가하게 되는 단점을 갖는다. 이는 전력소모의 최적화가 필요한 이동통신 시스템에서 해결해야 할 문제이다. 따라서 반복복호 과정에서 최적의 성능이득을 얻은 뒤 더 이상의 반복복호를 중단시키는 중단기준(stop criterion)이 필요하게 된다.

본 논문에서는 터보복호기에서 프레임당 반복복호 횟수를 효과적으로 줄일 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 LLR 차의 절대 평균값을 이용하여 BER의 손실 없이 평균 반복복호 횟수를 감소시킬 수 있는 새로운 반복중단 알고리즘이다. 제안된 알고리즘의 성능 확인을 위해서 Log-MAP 알고리즘을 기반으로 한 터보부호 환경에서 MATLAB Tool을 이용하여 모의실험을 수행하였으며 기존의 알고리즘과 BER 성능 및 평균 반복복호 횟수를 비교 분석 하였다. 실험 결과, 기존의 반복중단 알고리즘에 비해서 평균 반복복호 횟수를 효과적으로 감소시킬 수 있었다.

II. 터보부호의 부호화 및 복호화

1. 터보부호기

그림 1은 인터리버와 두 개의 RSC 부호기로 구성된 부호율(R)이 1/3이고 구속장(K)이 4인 터보부호기를 나타낸다. 그림 1에서 d_k 는 입력 정보 비트이고 X_k 는

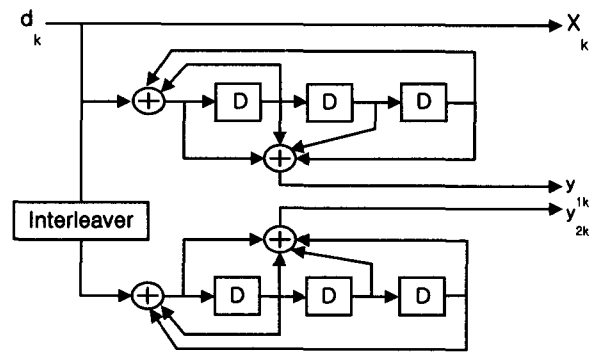


그림 1. 터보부호기(R=1/3, K=4)

Fig. 1. Turbo Encoder(R=1/3, K=4).

출력 정보 비트이고 y_{1k} 과 y_{2k} 는 RSC 부호기의 이중의 패리티 비트를 의미한다. 터보부호기는 구조적(systematic)인 형태이므로 한 프레임의 입력 정보비트 d_k 는 부호화 과정을 수행하지 않고 정보비트 X_k 를 출력한다.

첫 번째 부호기는 정보비트 원래의 입력 순서에 따라 패리티(parity)정보 y_{1k} 를 출력하고 두 번째 부호기는 인터리버에 의해서 순서가 재배열된 정보비트의 순서에 따라 두 번째 패리티정보 y_{2k} 를 출력하게 된다. 터보부호의 출력은 정보비트(X_k)와 인터리버를 통해서 변형된 출력으로 인해서 상관관계(correlation)가 작아지는 이중의 패리티 정보(y_{1k}, y_{2k})를 지니게 된다. 이러한 부호화 과정은 프레임 단위로 이루어지며 한 번에 부호화되는 정보 프레임의 길이는 부호기의 내부에서 사용되는 인터리버의 크기와 같다.

2. 터보복호기

이론적으로 터보복호기에 사용되는 MAP 알고리즘은 각각의 정보비트에 대한 사후 확률값인 APP를 정확히 추정할 수 있다. 그러나 MAP 알고리즘은 우수한 성능에도 불구하고 추정된 비트에 대하여 상당량의 곱셈연산과 지수연산을 필요로 하기 때문에 시스템에 그대로 적용하기에는 문제점이 있다. 이러한 문제점들은 로그 영역에서 동작을 수행하도록 하면 크게 감소시킬 수 있다. 그림 2는 2개의 Log-MAP 복호기와 인터리버, 디인터리버로 구성된 터보복호기를 나타낸다.

로그 영역에서는 곱셈 연산이 덧셈 연산으로 처리되고 나눗셈 연산은 뺄셈 연산으로 처리되기 때문에 MAP 복호기를 로그 영역에서 구현할 수 있다.

BPSK 변조된 수신신호를 $R_1^N = (R_1, R_2, \dots, R_N)$ 이

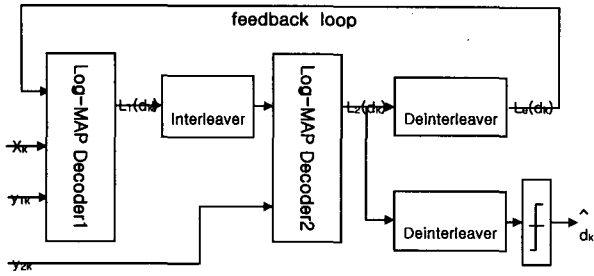


그림 2. 터보복호기
Fig. 2. Turbo Decoder.

라 하면 $R_k=(X_k, Y_k)$ 는 시간 k 에서 수신된 심볼을 나타내며 X_k 와 Y_k 는 각각 복호기의 입력으로서 식(1), (2)와 같다.

$$X_k = (2d_k - 1) + n_k \quad (1)$$

$$Y_k = (2p_k - 1) + m_k \quad (2)$$

식(1), (2)에서 d_k, p_k 는 각각 부호기의 출력값이며 n_k, m_k 는 각각 평균(mean)이 0(zero)이고 분산(variance)이 σ^2 인 백색 가산성 가우시안 잡음이다.

MAP 알고리즘은 R_k^N 값이 수신된 후 수신된 심볼에 대하여 유사도(likelihood ratio)를 구하여 정보비트 d_k 를 결정하는 것으로 정보비트 d_k 에 대한 LLR (Log Likelihood Ratio) L_k 값은 식(3)과 같다.

$$L_k(d_k) = \log \left(\frac{P_r(d_k=1 | R_k^N)}{P_r(d_k=0 | R_k^N)} \right) \quad (3)$$

$$= \log \left(\frac{\sum_{m=0}^{2^v-1} \alpha_k^1(m) \beta_k^1(m)}{\sum_{m=0}^{2^v-1} \alpha_k^0(m) \beta_k^0(m)} \right)$$

식(3)에서 $i=0, 1$ 일 때 $\alpha_k^i(m)$ 값은 순방향 상태 매트릭(Forward state metric)이라 하며 이것은 정보 비트 i 의 천이 비트를 가지고 시간 k 와 그 때의 상태 $S_k(m)$ 에서 다음 상태로의 천이를 위한 상태 매트릭 값을 나타낸다. $\beta_k^i(m)$ 값의 계산은 $\alpha_k^i(m)$ 값의 계산 과정과 유사하게 나타나며 단지 계산의 진행 과정이 $\alpha_k^i(m)$ 과는 반대인 역방향 상태 매트릭(backward state metric)값을 나타낸다. 로그 영역에서 수식을 처리하기 위해서 식(4)와 같은 E 연산자를 이용한다. 이러한 E 연산자는 미리 계산한 후에 Look-up table에 저장하여 사용할 수 있다.

$$E_{m=0}^{2^v-1} g(m) = E g(0) \cdot E g(1) \cdot E g(2) \cdots E g(2^v-1) \quad (4)$$

$$= \log \left(\sum_{m=0}^{2^v-1} \exp(g(m)) \right)$$

식(4)에서 정의한 E 연산자는 Jacobian logarithm을 고려하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$x E y = \log_e(e^x + e^y) = \ln(e^x + e^y)$$

$$= \max(x, y) + \log_e(1 + \exp(-|y-x|)) \quad (5)$$

$$= \max(x, y) + f_c(|y-x|)$$

식(5)에서 x 와 y 는 정보 비트이고 $f_c(|y-x|)$ 는 두 수 사이의 차이에 관한 함수이며 정정 함수(correction function)라고 한다. 식(4)의 대수 영역에서 덧셈은 정정 함수에 따라서 최대값 동작으로 나타나게 된다. 만약 x 와 y 가 서로 다르다면 정정 함수 $f_c(|y-x|)$ 는 '0'에 근접하게 된다. 따라서 식(5)를 근사화하여 다시 표현하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x E y = \ln(e^x + e^y) \approx \max(x, y) \quad (6)$$

식(5)의 E 연산자와 식(3)의 순방향 상태 매트릭 값과 역방향 상태 매트릭 값을 이용하여 새로운 순방향 상태 매트릭 값인 $A_k^i(m)$, 역방향 상태 매트릭 값인 $B_k^i(m)$ 과 가지 매트릭 값인 $D_k^i(m)$ 을 식(7), (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_k^i(m) = D_i(R_k, m) + E_{j=0}^1 [A_{k-1}^j(S_j^i(m))] \quad (7)$$

$$B_k^i(m) = E_{j=0}^1 [B_{k+1}^j(S_j^i(m))] + D_j(R_{k+1}, S_j^i(m)) \quad (8)$$

$$D_k^i(m) = \frac{2}{\sigma^2} (x_k^i + y_k^i Y_k^i(m)) \quad (9)$$

$A_k^i(m)$ 와 $B_k^i(m)$ 이 계산과정 중에 제한된 값의 범위를 넘어서는 것을 방지하기 위해 재 평준화 과정과 관련된 식으로 표현하면 식(10), (11)로 나타낼 수 있다^[7].

$$A = (A_{\min} + A_{\max})/2 \quad (10)$$

$$B = (B_{\min} + B_{\max})/2 \quad (11)$$

식(10), (11)에서 A와 B는 각각 순방향 상태 매트릭 값과 역방향 상태 매트릭 값을 나타내며, A_{\min} 과 B_{\min} 은 상태 매트릭 값인 A와 B의 가장 작은 값을 나

타내고, A_{\max} 과 B_{\max} 는 A와 B의 가장 큰 값을 나타낸다. 이 값들은 사후 확률값인 APP (A Posteriori Probability)의 계산에 적용되어 터보 복호기의 최종 출력값인 연관정 출력값을 산출할 수 있게 된다. 식(3)에 식(10), (11)을 대입하여 새로운 사후 확률값인 LLR 값을 다시 표현하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L(d_k | R_1^N) &= \frac{E_{m=0}^{2^{v-1}} [A_k^1(m) + B_k^1(m)]}{E_{m=0}^{2^{v-1}} [A_k^0(m) + B_k^0(m)]} \\ &= E_{m=0}^{2^{v-1}} [A_k^1(m) + B_k^1(m)] - E_{m=0}^{2^{v-1}} [A_k^0(m) + B_k^0(m)] \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)를 이용하여 신뢰할만한 연관정 출력값인 $L(d_k)$ 가 산출되면 경관정 값의 기준인 식(13)을 이용하여 정보비트 d_k 값을 결정할 수 있게 된다.

$$\begin{cases} L(d_k | R_1^N) \geq 0 \rightarrow \hat{a}_k = 1 \\ L(d_k | R_1^N) < 0 \rightarrow \hat{a}_k = 0 \end{cases} \quad (13)$$

지금까지의 과정으로 대부분의 연산은 덧셈 연산과 E 연산자의 호출로 변환되어 계산 과정이 간단해진다. log 영역에서 동작하는 MAP 알고리즘에는 Log-MAP과 max-Log-MAP 알고리즘의 두 가지의 형태가 있는데 두 알고리즘의 차이는 log 영역에서 덧셈 연산을 수행하는가에 있다. Log-MAP 알고리즘에 대한 수학적 연산은 로그 영역에서 곱셈 연산과 나눗셈 연산이 덧셈 연산과 뺄셈 연산으로 바뀌게 되므로 하드웨어 구현시에 복잡도를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그리고, 정정 함수 부분은 단지 두 값의 차이에 의존하기 때문에 1차원 Look-up table로 간단히 구현될 수 있다.

결론적으로 복호기의 연관정 출력값 $L(d_k)$ 를 다시 표현하면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_k(d_k) = L_c x_k + L_a(d_k) + L_e(d_k) \quad (14)$$

식(14)에서 $L_c x_k$ 는 시간 k 에서 수신된 구조적인 심볼에 대한 것만을 나타내며 $L_a(d_k)$ 는 입력비트 d_k 에 대한 사전정보(a priori information)를 나타낸다. 그리고 $L_e(d_k)$ 는 입력비트 d_k 와 관계하여 나타나는 새로운 정보인 외부정보(extrinsic information)로서 시간 k 에서 구조적(systematic)인 데이터를 제외한 모든 데이터와 패리티 비트들에 대한 정보를 가지게 된다. 이 외부정보 $L_e(d_k)$ 는 첫 번째 복호기에서 사용된 후 다시 인터리빙(interleaving)되며 이 정보는 입력비트 d_k 에 대한

사전확률인 APP로서 두 번째 복호기에 입력된다. 두 번째 복호기에서 사용된 후 디인터리빙(deinterleaving)하여 첫 번째 복호기에 입력될 외부정보를 생성한다. 이러한 일련의 과정을 설정된 반복복호 횟수만큼 반복하여 BER 성능을 향상시키게 되고 원래의 정보에 가까운 값을 얻게 된다.

III. 제안된 반복복호 중단 알고리즘

1. 기존의 반복복호 중단 알고리즘

터보부호는 인터리버의 크기가 크고 반복복호가 충분히 수행되었을 때 사후 한계에 근접하는 BER 성능을 보인다. 그러나 인터리버와 반복복호 횟수 증가에 따른 복호지연 발생하여 실시간 처리가 어려워지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 복호기에서 미리 정해진 반복복호 횟수가 아닌 가변적으로 반복복호를 중단하는 알고리즘이 발표되었다^[8-10]. 기존의 반복복호 중단 알고리즘으로는 Hagenauer에 의해서 제안된 교차엔트로피(Cross Entropy)와 Shao 등에 의해서 제안된 부호변화율(Sign Change Ratio)과 경관정(Hard Decision Aided) 중단 알고리즘이 있다^{[8][10]}. 터보부호의 복호과정에서 i 번째 반복복호 후 복호기 1, 2의 LLR은 식(15)와 같다. 그리고 두 복호기의 LLR 출력의 차는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1^{(i)}(\hat{d}_k) &= L_c \hat{x}_k + L_{e2}^{(i-1)}(\hat{d}_k) + L_{e1}^{(i)}(\hat{d}_k) \\ L_2^{(i)}(\hat{d}_k) &= L_c \hat{x}_k + L_{e1}^{(i)}(\hat{d}_k) + L_{e2}^{(i)}(\hat{d}_k) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} L_2^{(i)}(\hat{a}_k) - L_1^{(i)}(\hat{a}_k) &= L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k) - L_{e2}^{(i-1)}(\hat{a}_k) \\ &= \Delta L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k) \end{aligned} \quad (16)$$

그리고 이를 이용하여 길이가 N 인 정보블럭 $\hat{a} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)$ 에 대한 두 복호기의 확률분포 $P_1^{(i)}(\hat{a})$ 와 $P_2^{(i)}(\hat{a})$ 의 교차 엔트로피는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T(i) &= E_{P_2^{(i)}} \left\{ \log \frac{P_2^{(i)}(\hat{a})}{P_1^{(i)}(\hat{a})} \right\} \\ &= \sum_k E_{P_2^{(i)}} \left\{ \log \frac{P_2^{(i)}(\hat{a}_k)}{P_1^{(i)}(\hat{a}_k)} \right\} \\ &\approx \sum_k \frac{|\Delta L_{e2}^{(i)}(\hat{a}_k)|^2}{\exp(|\Delta L_{e1}^{(i)}(\hat{a}_k)|)} \end{aligned} \quad (17)$$

이때 $T(i)/T(1)$ 가 ($10^{-2} \sim 10^{-4}$)까지 감소하였을 때 큰 성능 저하없이 두 확률분포 $P_1^{(i)}(\hat{a})$ 와 $P_2^{(i)}(\hat{a})$ 가 충분히

히 가깝다고 판정하여 반복을 중단시킬 수 있다. 그러나 Hagenauer가 제안한 교차 엔트로피 중단 알고리즘은 복잡한 계산을 포함하고 있어 구현상의 어려움이 있다. 그리고 이러한 문제점을 해결하기 위해 비교적 간단한 중단 알고리즘들이 제안되었다. 특히 부호변화를 중단 알고리즘은 외부정보 $L_2^{(i)}(\hat{d}_k)$ 과 $L_2^{(i-1)}(\hat{d}_k)$ 의 부호(sign)가 반복복호에 따라 변하는 개수 $\alpha(i)$ 를 구하고 $\alpha(i)/N$ 이 (0.005~0.03)보다 작으면 반복복호를 중단한다. 그리고 복호기의 연판정 출력값인 $L_2^{(i)}(\hat{a}_k)$ 과 $L_2^{(i-1)}(\hat{a}_k)$ 의 부호가 정보 블록의 모든 심볼에 대하여 같으면 반복복호를 중단하는 경판정 중단 알고리즘이 있다. 결론적으로, SCR 반복중단 알고리즘이 CE 반복중단 알고리즘에 비해서 더 효율적이며 계산량 및 하드웨어 복잡도(complexity)가 감소하게 된다는 장점을 가진다. 또한, HDA 반복중단 알고리즘은 동일한 BER 성능을 가정하면 낮은 SNR에서 중간 정도의 SNR까지는 평균 반복복호 횟수가 감소하는 장점이 있으나 높은 SNR에서는 CE 반복중단 알고리즘이나 SCR 반복중단 알고리즘보다 비효율적이다.

2. 제안된 반복복호 중단 알고리즘

본 논문에서 제안하는 반복중단 알고리즘은 BER 성능의 손실 없이 효과적으로 평균 반복복호 횟수를 감소시키기 위해서 복호기의 연판정 출력값인 LLR을 이용하여 중단조건을 검사하게 된다. LLR 출력값은 정보비트 d_k 에 대한 신뢰도를 나타내며 반복복호시 성능향상에 중요한 역할을 하게 된다. 그림 3에 나타난 것과 같이 반복 횟수가 증가함에 따라서 $\overline{|L_2^{(i)}|}$ 가 수렴함을 알 수가 있다.

따라서 반복복호 과정에서 정보 프레임이 일정한 값으로 수렴한다고 판단되면 복호를 중지하고 그렇지 않으면 계속 반복복호를 수행하여 오류를 정정한다. 이를 위해서 각 $\overline{|L_2^{(i)}|}$ 을 수렴영역과 비 수렴영역으로 정의해야 하며 이에 의해 정보 프레임의 수렴여부를 정의해야 한다. 정보 프레임의 수렴 여부를 결정하기 위하여 식(15)의 두 번째 복호기에서 LLR을 측정하고 프레임의 모든 비트에 대해서 현재 반복복호와 이전 반복복호에서 LLR 차의 절대값을 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta M_n(i) = |L_2^{(i)}(\hat{d}_k) - L_2^{(i-1)}(\hat{d}_k)| \quad (18)$$

식(18)에서 N 개의 정보 비트에 대하여 평균값을 구

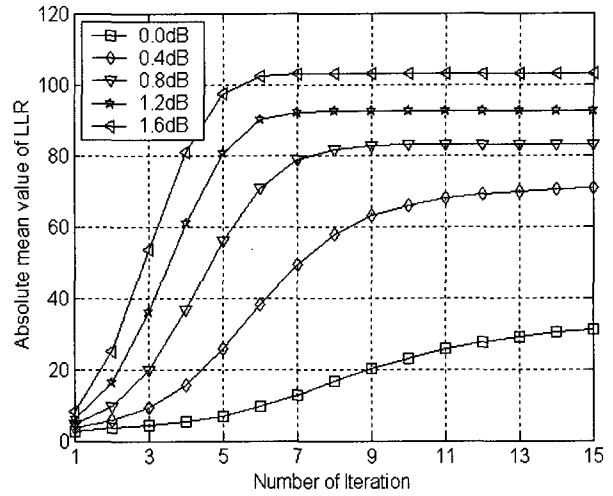


그림 3. 각 반복 횟수에 따른 LLR의 절대 평균값($\overline{|L_2^{(i)}|}$)
 Fig. 3. Absolute mean value of LLR($\overline{|L_2^{(i)}|}$) according to each number of iteration.

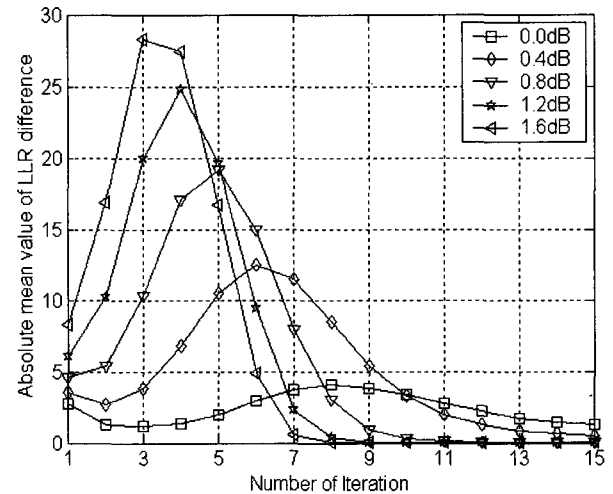


그림 4. 각 반복 횟수에 따른 LLR 차의 절대 평균값($\overline{\Delta M(i)}$)
 Fig. 4. Absolute mean value of LLR difference($\overline{\Delta M(i)}$) according to each number of iteration.

하면 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\Delta M(i)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M_n(i) \quad (19)$$

그림 4에서 알 수 있듯이 최대 $\overline{\Delta M(i)}$ 값을 넘어서면 증가량이 급격히 감소하기 때문에 임의의 값으로 수렴한다고 판정할 수 있다. 따라서 추가적인 반복복호가 결과에 미치는 영향이 작게 된다. 그러므로 반복복호를 최대 $\overline{\Delta M(i)}$ 값이 나타나는 시점에서 반복을 중단하는 것이 본 논문에서 제안하는 반복중단 알고리즘이다.

각 반복에서의 중단을 위한 조건식은 식(20)과 같이

나타낼 수 있다.

$$\overline{\Delta M}(i) \geq TH \cdot \overline{\Delta M}(1) \quad (20)$$

여기서 i 는 반복복호의 횟수이며, TH 는 반복복호를 중단하기 위한 임계값이며 (0.5 ~5.3)의 값을 갖는다. LLR 차의 절대 평균값을 이용한 반복중단 알고리즘은 현재 반복 과정에서 계산된 LLR의 $\overline{\Delta M}(i)$ 과 첫 번째 반복 과정에서 계산된 LLR의 $\overline{\Delta M}(1)$ 을 주어진 임계값과 비교함으로써 $TH \cdot \overline{\Delta M}(1)$ 보다 큰 경우에 반복복호를 중단한다. 중단조건은 시스템의 성능에 최대한 영향을 미치지 않도록 적절한 임계값을 설정해 주어야 한다. 임계값 설정에 있어서 너무 높게 설정할 경우 원하지 않는 반복으로 인한 복호지연이 발생하게 되고 너무 낮게 설정할 경우 원하는 BER 값을 얻을 수 없으므로 적절한 임계값 설정은 필수적이다. 본 논문에서는 TH 값을 3.1로 설정하였다.

제안된 중단조건은 반복복호 횟수를 성능 감소 없이 줄이므로 지연과 계산량을 효과적으로 감소시키게 된다. 또한 하드웨어 관점에서 지수함수 계산이 필요하지 않으므로 비교적 간단하게 구성할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서는 기존의 반복중단 알고리즘과 제안된 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수와 BER 성능을 비교하기 위해서 모의실험을 수행하였다. 성능을 분석하기 위한 파라미터로는 AWGN 환경에서 부호율 1/3, 생성다항식이 (15,17)₈ 이고 구속장 (K)는 4이며 프레임 크기는 1024이다. 또한 랜덤 인터리버를 사용하였고, 복호알고리즘은 Log-MAP 알고리즘을 사용하였으며 최대 반복복호 횟수는 15회로 하였다.

그림 5는 최대 15회의 반복복호를 모두 수행한 경우와 기존의 반복중단 알고리즘 및 제안된 반복중단 알고리즘의 BER 성능을 나타내었다. 그림 5에서 CE 중단조건 임계값은 0.001로 설정하였고 SCR 중단조건 임계값은 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 1은 반복중단 알고리즘에 따른 평균 반복복호 횟수를 비교한 것으로서 제안된 반복중단 알고리즘은 기존의 반복중단 알고리즘에 비해서 평균 반복복호 횟수

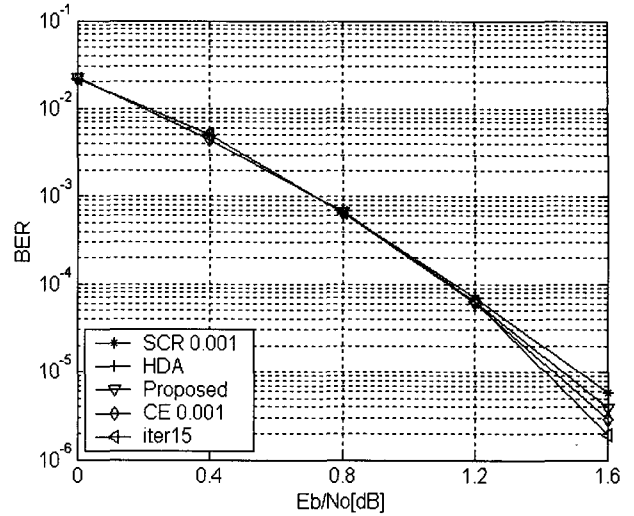


그림 5. 반복중단 알고리즘에 따른 BER 성능곡선
Fig. 5. BER according to iterative decoding stop criterion.

표 1. 중단조건에 따른 평균 반복복호 횟수의 비교
Table 1. Comparison of average iterative decoding number according to stop criterion.

[dB]	SCR	HDA	CE	Proposed
0.0	11.7006	11.7693	11.4481	11.3756
0.4	6.9710	6.9368	7.1140	6.4270
0.8	4.4720	4.4525	4.6025	4.2930
1.2	3.8462	3.6468	3.5637	3.2612
1.6	3.3640	3.1706	3.0881	2.8943

가 감소함을 알 수가 있다. 또한 CE 반복중단 알고리즘과 비교할 때 최대 9.65% 정도의 평균 반복복호 횟수가 감소함을 확인하였다. 결론적으로 제안된 반복중단 알고리즘의 평균 반복복호 횟수는 감소하며 BER 성능은 비교적 좋게 나타났다.

V. 결 론

터보부호는 반복복호 알고리즘을 사용하여 사는 한계에 근접한 BER 성능을 나타내는 오류정정 능력을 갖고 있다. 오류정정 능력은 반복복호 횟수에 따라 차이가 있다. 반복복호 횟수가 증가하면 오류정정 능력은 향상되지만 다양한 채널환경에서 SNR이 증가 할 때 무의미한 반복이 이루어져 복호지연이 발생한다.

따라서 본 논문에서는 반복복호 과정에서 연관성 출력값의 평균값을 중단조건으로 이용하여 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수를 크게 감소시킬 수 있는

반복중단 알고리즘을 제안하였다. 제안된 반복중단 알고리즘은 기존의 SCR, HDA, CE 반복중단 알고리즘보다 BER 성능의 손실없이 평균 반복복호 횟수에서 감소함을 확인하였다. 특히 CE 반복중단 알고리즘과 비교할 때 6.27%~9.65% 정도의 평균 반복복호 횟수가 감소함을 확인하였다. 따라서 LLR 차의 절대 평균값을 이용하는 반복 복호기에 적용될 경우, 복호 지연시간 단축과 전력소모 감소의 효과가 있을 것으로 사료된다.

Turbo Decoding," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.

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'93*, pp. 1064-1070, May 1993.
- [2] 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.
- [3] S. S. Pietrobon, and A. S. Babulescu, "A Simplification of the Modified Bahl Decoding Algorithm for Systematic Convolutional Codes," *Proc. of ISITA'94*, Sydney, Australia, pp. 875-880, Nov. 1994.
- [4] S. S. Pietrobon, "Implementation and Performance of a Turbo/MAP decoder," *Int. J. Satellite Communication*, vol. 16 pp. 23-46, Jan-feb. 1998.
- [5] J. Couleaud, "High-Gain Coding Schemes for Space Communications," *ENSICA Final year report* 42-121, May. 1995.
- [6] P. Robertson, E. Villebrun and P. Hoeher, "A Comparison of Optimal and Sub-optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain," in *Proc. of ICC'95*, Seattle, WA, USA, pp. 1009-1013, June 1995.
- [7] S. S. Pietrobon, "Implementation and Performance of a Serial MAP Decoder for use in an Iterative Turbo Decoder," *Proc. of IEEE Int. Symp. Information Theory*, Whistler, British Columbia, Canada, pp. 471, Sep. 1995.
- [8] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 42, no. 2, pp. 429-445, Mar. 1996.
- [9] Y. Wu, B. D. Woerner, and W. J. Ebel, "A simple stopping criteria for Turbo decoding," *IEEE Communications Letters*, vol 4, no. 8, pp. 258-260, Aug. 1999.
- [10] Rose Y. Shao, Shu Lin, and Marc P. C. Fossorier "Two Simple Stopping Criteria for

저 자 소 개



심 병 섭(정회원)
 1998년 원광대학교
 전자공학과 공학사.
 2000년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학석사.
 2003년 원광대학교 대학원
 전자공학과 박사수료.

2005년 4월~현재 원광대학교 전기전자 및
 정보공학부 강의교수.
 <주관심분야 : 이동통신, 부호이론, SoC 설계>



이 완 범(정회원)
 1995년 원광대학교
 전자공학과 공학사.
 1997년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학석사.
 2004년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학박사.

<주관심분야 : 디지털신호처리, 영상처리, VLSI
 회로설계>



정 대 호(정회원)
 1995년 원광대학교
 전자공학과 공학사.
 1997년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학석사.
 2003년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학박사.

2004년 ~ 현재 원광대학교 전기전자 및
 정보공학부 강의교수.
 <주관심분야: 채널부호, 부호이론, 터보부호,
 CAD & ASIC Design, SoC Design>

임 순 자(정회원)

대한전자공학회 제41권 SD편 제4호 참조



김 태 형(정회원)
 1989년 원광대학교
 전자공학과 공학사.
 1991년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학석사.
 2002년 원광대학교 대학원
 전자공학과 공학박사.

1995년~현재 익산대학 전자정보과 교수.
 <주관심분야 : 이동통신, ASIC, 음향시스템>

김 환 용(정회원)

대한전자공학회 제41권 SP편 제5호 참조