

W-CDMA 터보디코딩을 위한 효율적인 Stopping Criteria

이동수, 박인철
KAIST 전자전산학과

Simple and Efficient Stopping Criteria for W-CDMA Turbo Decoding

Dong-Soo Lee, In-Cheol Park
Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST
E-mail : dslee@ics.kaist.ac.kr

Abstract

In this paper, we propose new simple and efficient stopping criteria for W-CDMA turbo decoding. The new criteria are based on the sum of logarithm of absolute extrinsic information values and the count of one-estimations calculated after each component decoder. The calculation of the proposed criteria can be made simpler by summing one of ten values without any penalty. This proposed method can be implemented with negligible overhead and no extra memory. Simulation results on W-CDMA standard shows that the number of iterations required is reduced compared to the existing stopping criteria without degrading the BER performance. Reduced iterations and simple operations make the proposed criteria desirable for low-power turbo decoder.

I. 서론

1993 년 Berrou 에 의해 처음 발표된 터보 코드는 이론적 한계인 Shannon limit 에 가장 근접한 에러복구 능력을 보여주었고 [1], W-CDMA 등의 현대 무선통신의 표준에 이용되고 있다.

터보코드의 디코딩 방법은 그림 1 에서와 같이 전단의 디코딩 결과값이 다음 디코더의 priori information 으로 이용됨으로써, 디코딩을 반복할수록 에러복구 능력이 향상되는 구조를 가지고 있다. 그러나 이러한 반복적인 디코딩 특성에 의하여 매우 높은 계산 복잡도를

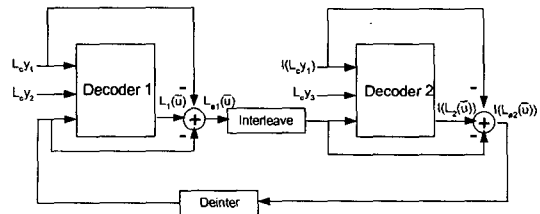


그림 1. Turbo Decoder 구조

가지게 되어 디코더가 latency 와 전력소모를 선형적으로 증가시킨다. 반복횟수는 SNR 값이 높은 곳에서 줄어드는 등의 채널에 따른 특성을 보여주면서 무한정의 반복횟수에도 완전한 디코딩이 불가능한 경우도 있는 특징을 띄고 있다. 따라서 디코딩을 멈추는 시점을 각 frame 마다 결정하는 방법으로 평균적인 반복횟수를 크게 줄일 수 있다. 반복정지의 기준으로는 앞 뒤의 hard decision 결과를 비교하여 변화가 없으면 정지하는 방법 [2], decoder 한단의 priori information 과 extrinsic information 의 sign 을 비교하는 방법 [3] 등이 있다.

본 논문에서는 간단한 연산구조를 가지면서 기존방법보다 평균반복횟수를 줄이고 BER performance 를 떨어뜨리지 않는 새로운 반복정지 기준을 제안하고 W-CDMA 에서의 시뮬레이션 결과를 보인다.

II. 터보 디코더와 Stopping Criteria

2.1 Turbo Decoder

Turbo decoder 는 BPSK modulation 을 통과한 신호에 채널의 noise 가 첨가된 입력신호의 LLR(log likelihood ratio)를 계산하는 과정으로 이루어진다. Time index k 에 대해 다음과 같이 식이 주어진다.

$$u_k = \text{sign}[L(u_k)] \quad (1)$$

$$L(u_k) = \log[P(u_k=+1|y) / P(u_k=-1|y)] \quad (2)$$

Channel 을 통과한 information bit 과 parity bit 2 개를 각각 y_1, y_2, y_3 라 하고 channel reliability 를 L_c 라 할 때 positive feedback 을 방지하기 위하여 extrinsic information 은 LLR 값에서 $L_c y_1$ 과 priori information 값을 빼주게 된다. 여기서의 extrinsic information 은 interleaver 혹은 deinterleaver 를 통과한 후 다음 decoder 단의 priori information 으로 주어지게 되어 점진적으로 estimation 이 향상되는 특성을 보이게 된다.

반복되는 decoding 과정을 통하여 L_e (extrinsic information)의 절대값이 증가하게 되는데 채널 특성에 따라서 증가하는 정도가 달라지게 되고, 따라서 원하는 confidence 의 디코딩까지의 반복횟수가 달라지게 된다. 또한 어떤 경우는 무한정 반복을 하여도 LLR 혹은 L_e 값이 향상되지 않음에 따라 이러한 경우도 반복횟수를 줄일 필요가 있다. 평균 반복횟수를 줄이게 되면 전력 소모를 줄일 수 있고, 다음 블록을 빨리 불러 들여 throughput 을 증가시키거나 고정된 반복횟수를 이용할 때의 성능값으로 예상된 평균 반복횟수보다 더 증가된 반복횟수로 디코딩하여 성능을 증가시킬 수도 있다. [5]

LLR 값은 estimation 의 reliability 를 표현하며 sign 으로 인한 hard-decision 과 magnitude 로 인한 soft-decision 의 2 가지 특성을 한가지 값으로 표현해 줄 수 있게 된다. 이 값은 약간의 reliability 향상만으로도 크게 증가하게 되고 따라서 디코딩이 반복될수록 그 값이 급격히 커진다. 제안된 stopping criteria 는 이러한 특성을 이용하였다.

2.2 HDA(Hard-Decision Aided) Stopping Criteria

HDA(Hard-Decision Aided) 방식[2]은 각 iteration 의 hard decision 값을 메모리에 저장한 후 다음 iteration 과

비교하여 차이가 없을 경우 반복을 중단한다. 식으로 표현하면 다음과 같다. (K 는 frame 사이즈)

$$\text{for } i \geq 2, \text{ if } \text{sign}[L(u_k)^{2^i}] = \text{sign}[L(u_k)^{2^{i-1}}] \quad \forall k \in \{1 \dots K\} \quad (3)$$

식 (3)에서 $L(u_k)^{2^i}$ 는 i 번째 iteration 에서 2 번째 디코더 단의 LLR 값을 나타낸다. 단순한 방식에 비하여 frame 사이즈 만큼의 메모리를 요구하며 다음 iteration 에서 확신하게 되므로 반복횟수가 늘어날 수 있다.

2.3 Sign-Difference Ratio (SDR)

SDR(Sign-Difference Ratio) 방식[3]은 한 decoder 단의 priori information 과 extrinsic information 의 sign 을 비교하여 서로 다른 위치들의 개수 누적이 일정한 값보다 작으면 반복을 중단한다. 통상 frame 사이즈의 0.01 에서 0.001 사이의 값을 이용한다.

HDA 와 비교하면 메모리를 요구하지 않으면서 간단한 연산구조를 가지고 각각의 디코더에 대응할 수 있으므로 0.5 iteration 단위로 정지시킬 수 있다.

이 밖에도 CE(Cross Entropy) [4], SCR(Sign-Change Ratio), Min(Minimum LLR)등의 방법이 있다. Stopping Criteria 는 반복횟수는 줄이면서 구원 복잡도를 줄이는 방향으로 개선되어 왔다.

III. 제안된 Stopping Criteria

L_e 의 절대값은 디코딩이 성공적으로 이루어지는 bit 에 대하여 그 값이 급격히 증가하는 특징을 가진다. 이 때 error 가 나타나는 지점의 L_e 의 값을 살펴보면 그 magnitude 가 매우 작으면서 sign 도 불규칙적으로 바뀌는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 error 는 대부분 디코딩을 반복적으로 사용하여도 개선되지 않는 경우가 대부분이다.

첫번째 제안된 stopping criterion 으로서, 각 L_e 의 절대값의 log 값을 모두 합하여 그 크기가 일정 값보다 크게 될 경우 정지시키는 방법을 사용하였다. 수식으로 표현하면 다음과 같다. (θ 는 threshold)

$$\sum \{\log(|L_e(u_k)|)\} > \theta, \quad \forall k \in \{1 \dots K\} \quad (4)$$

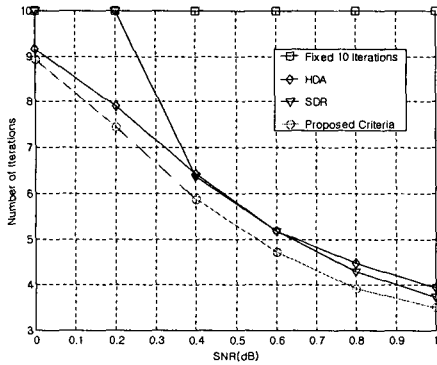


그림 2. Average number of iterations

L_e 의 절대값의 log를 취하게 되면 다음의 특징을 가진다.

- Decoding을 반복하면서 $|L_e|$ 가 값이 증가할 경우 $|L_e|$ 의 range가 크고 다양해지는 점을 log를 취함으로써 일정 range로 만들 수 있다.
- 1보다 작은 절대값의 L_e 는 음의 값을 갖게 되어 error가 나타나면 measurement에 대해 negative 효과를 가진다.
- Summation의 값이 급격한 증가를 막을 수 있어서 각 SNR에 대한 threshold를 비슷한 값으로 맞춰줄 수 있다.

Threshold는 시뮬레이션을 통하여 BER performance와 iteration의 performance를 trade-off하여 결정하였다. 대부분의 경우 L_e 의 magnitude는 반복 디코딩에 따라 함께, 크게 증가하는 현상을 보인다. 따라서 (4)의 식은 Error를 대부분 잡은 경우에 대한 measurement로 이용될 수 있다. SNR이 낮아 많은 iteration이 필요할 경우와 SNR이 높아 적게 필요할 경우의 차이는 log값을 취하여 (4)의 계산을 할 경우 크게 다르지 않은 threshold를 통하여 반복 종료 여부를 결정할 수 있을 것이다.

이 방법을 보다 효과적으로 하기 위하여 두 번째의 별도의 조건으로, 각 hard-decision된 결과를 모두 합하는, 즉 1로 decoding된 estimation 개수를 누적하여 전 iteration의 값과 비교하여 같을 경우를 함께 만족시키도록 하였다. 따라서 간단한 counter로 구현이 가능하다. 이 방법을 동시 만족하게 할 경우의 Threshold 값은 전보다 약간 작아진다.

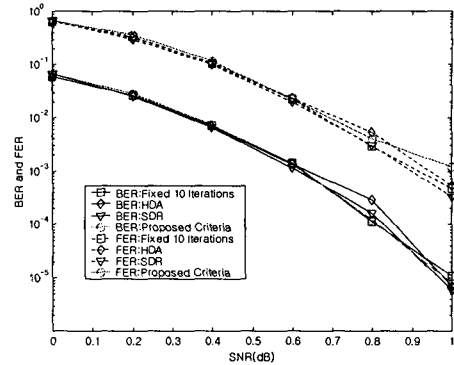


그림 3. BER and FER Performance

Error가 나타나는 bit의 estimation의 sign 값이 일정하지 않고 변하는 현상을 이용한 것으로서 매우 작은 error로 인한 반복횟수의 낭비를 줄일 수 있게 된다. 따라서 앞의 방법과 연계되어 보완의 의미를 가지게 된다.

마지막으로 매 bit마다 (4)의 계산을 하지 말고 매 10번마다 하나씩을 골라 summation하였을 경우도 시뮬레이션 하였다. 이 경우 연산 구조는 1/10으로 단순해지고 threshold도 그만큼 줄어든다. 3가지 제시된 방법을 모두 이용함으로써 매우 간단한 연산 구조를 가지면서도 별도의 메모리를 요구하지 않게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 W-CDMA standard에 제시된 encoder와 interleaver를 이용하여 C언어로 구현되었다. 1024의 frame size를 가지며 AWGN 채널을 가정하였다. 비교 stopping criteria로서 HDA, SDR과의 average iteration 횟수, performance를 측정하였다. 이 때 10개의 iteration을 넘지 않도록 한다. 또한 10개의 fixed iteration의 경우도 측정하였다.

그림 2와 그림 3에서 앞에서 제시된 방법을 모두 사용했을 경우에 대해 비교한 평균 반복횟수와 BER(bit error rate), FER(frame error rate)를 보이고 있다. Threshold 값은 360에서 500사이의 값을 이용하였다. SNR이 작을수록 이 값은 작아진다. 그 결과 평균 반복횟수는 기존의 stopping criteria보다 약 10% 줄어들면서 BER performance는 10번의 fixed iteration의 경우와 그다지 차이가 없음을 볼 수 있다.

표 1. SNR=0.6 의 threshold 결정

SNR = 0.6dB , Sum of Log & Counting 1 (1/10)			
Threshold	Iteration	BER	FER
430	4.4545	0.001453	0.03053
450	4.5890	0.001320	0.02805
460	4.6256	0.001220	0.02655
470	4.7303	0.001071	0.02251
480	4.8136	0.001072	0.02261
490	4.9150	0.001024	0.02321

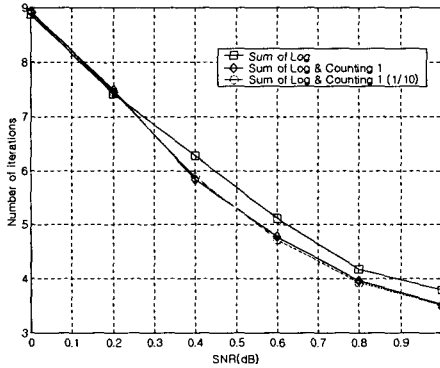


그림 4. Average number of iterations

그림 4 와 그림 5 에서 제시된 3 가지 방법에 대한 비교를 보여준다. 1 의 개수를 비교하는 방법을 이용한 경우 performance 는 유지하면서 iteration 이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 또한 10 개 중 한 개만을 골라 연산하는 경우 거의 완전하게 전체를 계산하는 경우와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 모든 bit 에 대하여 계산할 필요가 없음을 보여준다.

표 1 에서 3 가지 방법을 모두 썼을 때의 trade-off 를 위한 threshold 값을 결정하는 과정을 보이고 있다. 어느 이상 threshold 를 하면 iteration 만 증가하고 성능의 향상은 없음을 알 수 있다. SNR=0.6dB 의 경우 470 의 threshold 에서 약 4.73 번의 iteration 이 필요함을 알 수 있다.

1 의 개수를 counting 하는 경우는 threshold 를 일부러 낮추어 작은 error 의 frame 을 넘기는 방법이다. 이 때 threshold 값은 7~10% 감소된다.

V. 결론

본 논문에서는 간단한 연산구조를 가지고 메모리를 필요로 하지 않으면서 기존의 방법에 비하여 약 10%의

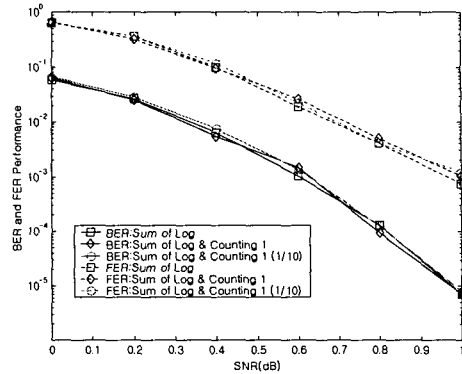


그림 5. BER and FER Performance

iteration 을 줄일 수 있는 새로운 stopping criteria 를 제시하였다. 터보 디코더의 output 특성을 이용하여 extrinsic information 의 log 값들의 합을 threshold 와 비교하고, 1 의 개수를 누적한다. 이 때 연산량을 1/10 으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 10 개의 fixed iteration 과의 비교를 통해 1dB 에서 약 66%의 iteration 을 줄임으로써 low-power turbo decoder 의 구현에도 매우 용이한 방법으로 쓰일 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes" in *ICC '93*. Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May 1993.
- [2] R. Y. Shao, S. Lin, and M. C. P. Fossorier, "Two Simple Stopping Criteria for Turbo Decoding" *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 47, no. 8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.
- [3] Y. Wu, B. D. Woerner, and W. J. Ebel, "A Simple Stopping Criterion for Turbo Decoding." *IEEE Communications Letters*, vol. 4, pp. 258-260, Aug. 2000.
- [4] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 42, no. 2, pp. 429-445. Mar. 1996.
- [5] F. Gilbert, F. Kienle, and N. Wehn, "Low Complexity Stopping Criteria for UMTS Turbo-Decoders", in *VTC 2003- Spring*, vol. 4, pp. 2376-2380, April. 2003.