

Log-MAP 방식의 Turbo 복호를 위한 효과적인 채널 신뢰도 부과방식

정희원 고성찬*, 정지원**

An Efficient Method that Incorporate a Channel Reliability to the Log-MAP-based Turbo Decoding

Sung-Chan Ko*, Ji-Won Jung** *Regular Members*

요 약

Turbo 복호기에 입력되는 k번째의 수신신호(정보신호 X_k , 패리티신호 Y_k)의 양자화 비트수는 하드웨어의 복잡성과 성능을 최적적으로 절충하여 결정되어야 하므로 양자화 비트수의 결정은 Log-MAP 방식의 Turbo 복호기 구현에 있어서 매우 중요하다. 또한 Turbo 복호의 성능과 복잡성은 채널 신뢰도 L_c 의 처리방식에 의해 크게 좌우되므로 L_c 처리방식의 결정도 매우 중요하다. 본 논문에서는 Log-MAP 방식의 Turbo 복호시, 곱셈연산으로 표현되는 L_c 처리를 효과적으로 수행하기 위한 bit-shifting 방식을 제안하였고 이 경우 최적이라 사료되는 X_k, Y_k 의 양자화 비트수를 시뮬레이션을 통해 결정하였다. 또한 채널 신뢰도 L_c 의 평가에러가 Log-MAP 방식의 Turbo 복호 성능에 미치는 영향을 분석하여 L_c 평가의 적정범위를 제시하였다.

ABSTRACT

The number of quantization bits of the input signals X_k, Y_k needs to be optimally determined through the trade-off between the H/W complexity and the BER performance in Turbo codes applications. Also, an effective means to incorporate a channel reliability L_c in the Log-MAP-based Turbo decoding is highly required, because it has a major effect on both the complexity and the performance. In this paper, a novel bit-shifting approach that substitutes for the multiplying is proposed so as to effectively incorporate L_c in Turbo decoding. The optimal number of quantization bits of X_k, Y_k is investigated through Monte-Carlo simulations assuming that bit-shifting approach is adopted. In addition, the effects of an incorrect estimation of noise variance on the performance of Turbo codes is investigated. There is a confined range in which the effects of an incorrect estimation can be ignored.

1. 서론

채널 부호로는 길쌈부호, 볼록부호(BCH,RS 등), 연쇄부호등이 널리 사용되고 있으나, 이들 부호의 성능은 Shannon Limit와 다소 큰 차이를 보여왔다.

1993년 Berrou등에 의해 제안된 Turbo 부호는 복호시의 시간지연, 하드웨어의 복잡성등 다소 문제점들을 포함하고는 있지만 Shannon Limit와의 차이를 획기적으로 줄인 준최적의 채널코딩방식으로 알려져 있다^[1]. 현재까지 구성코드 및 인터리버등을 포함하여 많은 연구가 진행되고 있으며^{[2][3]}, 복호기에 대한

* 안동대학교 전자정보산업학부 디지털통신시스템 연구실(koChan@anu.andong.ac.kr)
 ** 한국해양대학교 전자공학과 위성통신 연구실(jwjung@hanara.kmaritime.ac.kr)
 논문번호 : 98471-1027, 접수일자 : 1998년 10월 27일

효과적인 구현방안도 활발히 연구되고 있다^[4].

Turbo 복호기는 최소 2개 이상의 SISO(Soft Input Soft Output) MAP(Maximum a Posteriori) 복호기 또는 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm) 복호기들로 구성되는데, 이들간에 extrinsic 정보를 반복적으로 교환(iteration)함으로써 반복횟수에 비례한 BER 성능개선을 이룰 수 있다. extrinsic 정보교환을 위해서는 수신신호 X_k, Y_k 에 대한 연관정값이 요구되는데, 연관정값의 양자화 비트수는 복호기의 성능과 하드웨어 복잡성에 밀접한 관계가 있으므로 양자화 비트수의 결정은 매우 중요하다. 복호에 있어서 SOVA 복호기를 적용한 경우보다 MAP 복호기를 적용한 경우, 더 큰 이득(coding gain)을 얻을 수 있으므로^[5], 본 논문에서는 MAP 방식의 Turbo 복호를 고려하도록 한다. MAP을 적용할 경우, 가지메트릭(branch metric) 계산시 수신신호 X_k, Y_k 이외에 채널 신뢰도값 L_c (AWGN 채널인 경우 $L_c=2/\sigma^2$)가 더 요구되므로 가지메트릭 계산전에 수신 잡음전력값이 평가되어야 한다. 채널 신뢰도값의 처리방식 또한, 성능과 복잡성을 크게 좌우하므로 L_c 의 처리방식 결정 역시 MAP 방식의 Turbo 복호에 있어서 매우 중요하다.

따라서 MAP 방식의 Turbo 복호기를 구현할 경우, X_k, Y_k 의 양자화 비트수에 따른 성능열화 및 잡음분산의 평가에러에 따른 성능열화는 매우 중요한 제고사항이 될 수 있다. 본 논문에서는 ①채널 신뢰도값의 평가에러가 MAP 방식의 Turbo 복호성능에 미치는 영향을 분석하여 적정범위를 제시하였고, ②곱셈연산대신 bit-shifting을 이용하여 채널 신뢰도값을 효과적으로 부과하는 방안을 제안하였으며, ③bit-shifting을 이용하는 경우, 성능과 복잡성을 최적으로 절충할 수 있는 X_k, Y_k 의 양자화 비트수를 결정하였다.

2장에서는 Turbo 복호에 대한 기본 이론을 언급하였고, 3장에서는 양자화 비트수의 결정 및 채널 신뢰도의 효과적 부과방식을 언급하였다. 4장에서는 잡음분산의 평가에러에 의한 성능열화값에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 고찰하였으며 5장에서 논문의 결론을 맺었다.

II. Turbo 부호의 부호화 및 복호화

그림 1은 인터리버와 두개의 RSC(Recursive Systematic Convolutional) 부호로 구성된 부호율 1/2인

Turbo 부호의 부호기를 나타낸 것이다. 1비트 입력(d_k)에 2비트가 출력(x_k, y_k)되는데 x_k 는 d_k 와 같고, y_k 는 y_{1k} 와 y_{2k} 를 교대로 puncturing한 값으로서 패리티 정보이다. 출력신호는 BPSK 또는 QPSK 변조되어 전송된다.

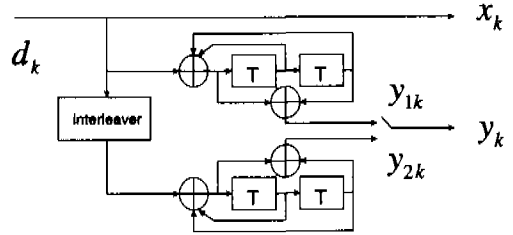


그림 1. 부호율 1/2인 Turbo 부호기($g_1/g_2=7/5$)

복호기 구조는 그림 2에서의 같이 인터리버, 디인터리버, 2개의 MAP 복호기로 구성된다. 복조된 N (인터리버의 크기에 해당함)개의 신호열은 $R^N = (R_1, \dots, R_k, \dots, R_N)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 $R_k = (X_k, Y_k)$ 이며 $X_k = 2(x_k - 0.5) + N_k$, $Y_k = 2(y_k - 0.5) + N_k$ 이다. N_k 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 잡음이다. 복조된 N 개의 신호열을 기초로 하여 k 번째 송신한 비트를 추정할 LLR(Log Likelihood Ratio) λ_k 는 식(1)과 같다.

$$\lambda_k = \frac{\log[\Pr(d_k=1 | R_1^N)]}{\log[\Pr(d_k=0 | R_1^N)]} = \frac{\sum_m a_k^m \delta_k^{0,m} \beta_{k+1}^{(0,m)}}{\sum_m a_k^m \delta_k^{1,m} \beta_{k+1}^{(1,m)}} \quad (1)$$

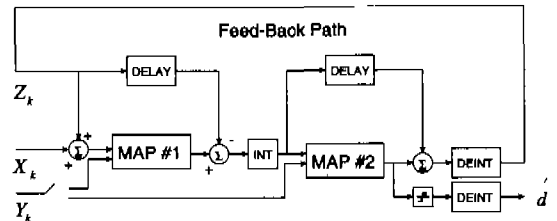


그림 2. Turbo 복호기

$$a_k^m = \sum_{i=0}^1 a_{k-1}^{b(i,m)} \delta_{k-1}^{b(i,m)} \quad (2)$$

$$\beta_k^m = \sum_{i=0}^1 \delta_{k-1}^{b(i,m)} \beta_{k+1}^{b(i,m)} \quad (3)$$

여기서, m 은 부호기의 상태값($2^v - 1$, v : 부호기 메모리수)을 의미하고 $b(i,m)$ 은 비트 i 가 입력되었을

때 부호기의 현재 상태를 m 으로 천이시킨 이전의 상태값을 의미하며, $f(i,m)$ 은 상태 m 에서 비트 i 가 입력되었을 경우 다음에 천이될 다음의 상태값을 의미한다. 그리고 d_k^i 은 가지메트릭으로서 다음과 같이 표현된다

$$d_k^i = \exp[2/\sigma^2 \times (X_k i + Y_k C_k^i)] \quad (4)$$

여기서, C_k^i 은 상태 m 에서 비트 i 가 입력되었을 때 부호기에서 생성되어 puncturing된 패리티 비트 값이다. MAP 복호를 위해서는 식(1)을 평가하여야 하는데 log 영역에서는 곱셈 연산이 덧셈연산으로 처리되기 때문에, 사실상 log 영역에서 MAP 복호기를 구현하는 것이 바람직하다^[5]. log 영역에서의 수식 처리를 위하여 다음과 같은 E 연산자가 도입된다.

$$a \ E b = -\ln(e^{-a} + e^{-b}) = \min(a, b) - \ln(1 + e^{-|a-b|}) \quad (5)$$

E 연산자를 도입하면 식(1)은 다음과 같이 변형된다.

$$L_k = E_{m=0}^{2^v-1} (A_k^m + D_k^{0,m} + B_k^{f(0,m)}) - E_{m=0}^{2^v-1} (A_k^m + D_k^{1,m} + B_k^{f(1,m)}) \quad (6)$$

$$A_k^m = E_{i=0}^1 (A_{k-1}^{i,m} + D_{k-1}^{i,m}) \quad (7)$$

$$B_k^m = E_{i=0}^1 (D_{k+1}^{i,m} + B_{k+1}^{f(i,m)}) \quad (8)$$

$$D_k^i = -2(X_k i + Y_k C_k^i) / \sigma^2 = -L_c(X_k i + Y_k C_k^i) \quad (9)$$

E 연산자 대신에 $\min(x,y)$ 을 사용하는 방식을 Sub-MAP 방식이라 하는데, 이 경우에는 복호성능이 채널 신뢰도값 $L_c = 2/\sigma^2$ 에 무관하므로 잡음분산을 평가할 필요가 없다. 그러나 이에 따른 성능열화가 초래된다. 그림 2의 부호기에서 첫번째 MAP 부호기는 총 3개의 입력을 X_k, Y_k, Z_k 가지는데, Z_k 는 두번째 MAP 부호기에서 신출한 extrinsic 정보이다. 이 extrinsic 정보는 첫번째 부호기에서 사용된 후 출력에서 제거되어 재 인터리버된다. 재 인터리버된 정보는 d_k 에 대한 사전확률정보로서 두번째

부호기에 입력되며, 출력단에서는 출력값에서 입력값을 제거하고 이를 디인터리버하여 첫 번째 MAP 부호기에 입력될 extrinsic 정보를 생성한다. 이러한 입력의 과정을 반복하여 BER 성능을 향상시키게 된다.

본 논문에서는 주로 시뮬레이션을 통해 주요 사항들을 결정하였으므로 먼저 성능평가의 정확성을 보이기 위하여 Log-MAP 방식과 Sub-MAP 방식의 Turbo 부호에 대해 시뮬레이션한 결과를 그림 3에 나타내었다. 여기서 LMx, SMx는 각각 Log-MAP 방식과 Sub-MAP 방식을 의미하며 반복횟수(iteration)가 x임을 의미한다.

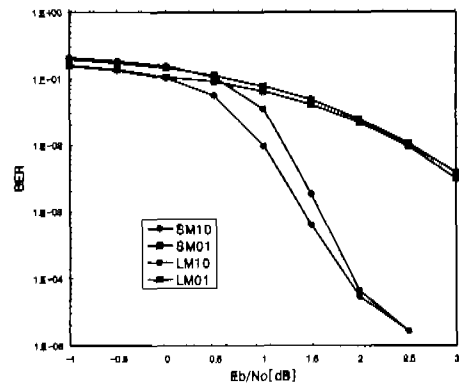


그림 3. Log-MAP 방식과 Sub-MAP 방식의 Turbo 부호 성능

블록크기 $N=1000$ 인 랜덤 인터리버를 사용하였고, $g1/g2=7/5$ 부호기를 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 문헌[6]의 결과와 매우 잘 일치하였으며, [7]에 주어진 이론치 bound와도 거의 일치하였다.

Ⅲ. 양자화 비트수의 결정 및 채널 신뢰도 값의 효과적 부과방식

Turbo 부호기를 포함하는 수신 시스템의 개략적인 블록도를 그림 4에 나타내었다. 본 논문에서는 디지털방식의 복조기를 고려한다.

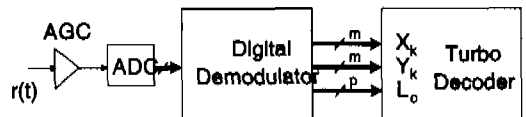


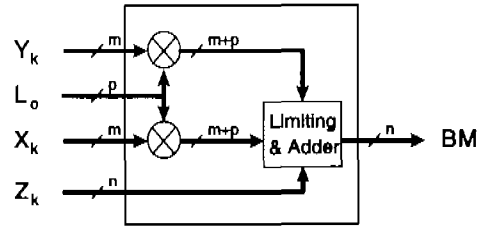
그림 4. 수신 시스템의 블록도

수신신호 $r(t)$ 는 AGC(Automatic Gain Control)를 거치고, 하향변환후 ADC(Analog to Digital Con-

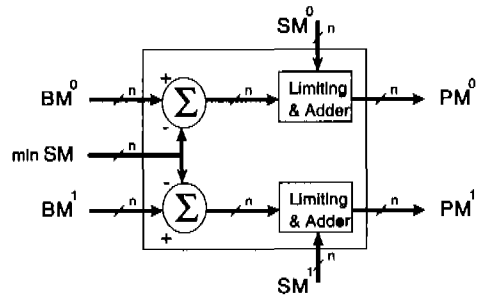
verter)에 의해 디지털 신호로 변환되거나 또는 sub-sampling 방식으로 직접 디지털 신호로 변환된다. Turbo 복호기에는 수신신호에 대한 연판정값이 입력되어야 하므로 복조기는 복조를 수행하고 난후 X_k, Y_k 에 대한 m 비트의 연판정 결과값 및 채널 신뢰도값 $L_c = 2/\sigma^2$ 에 대한 p 비트의 평가량을 출력한다. Turbo 복호에는 요구되는 연산량이 많고 특히 메모리가 많이 요구되기 때문에 복호성능과 H/W 복잡성을 최적으로 절충하여 비트수 m 과 p 을 결정하여야 한다. Log-MAP 방식의 Turbo 복호에서는 X_k, Y_k 및 L_c 비트수에 의해서 다른 주요 구성요소들의 비트수가 결정되므로 사실은 복호성능과 H/W 복잡성이 m 과 p 의 값에 의해 전적으로 좌우된다 하겠다.

Log-MAP 방식의 Turbo 복호기의 주요 구성요소들은 식(9)의 가지메트릭을 계산하는 BMC(Branch Metric Calculator), 경로메트릭을 결정하는 PMC(Path Metric Calculator), LLR을 계산하는 LLRC(Log Likelihood Ratio Calculator)등을 들 수 있으며, 이들에 대한 개략도는 그림 5와 같다. 그림 5-a)의 BMC 블록도에서 알 수 있듯이, 비트수는 곱셈 연산후 $m+p$ 로 증가하고 덧셈 후 1비트가 더 추가된다. 2번째 iteration 부터는 LLR값(즉 Z_k) n 비트가 입력되어 더해지므로 limiting adder 연산(최소, 최대값이 -2^{n-1} 와 $2^{n-1}-1$ 이 되도록 제한하여 덧셈하는 연산을 의미함)을 수행하지 않으면 iteration 수에 비례하여 n 값이 증가하게 된다. 예를 들어 $m=5, q=3$ 이면 1회 iteration시 BM은 9비트로 표현된다. limiting adder 연산을 수행하지 않으면 2회 iteration시 BM은 10비트로 표현되므로 비트수를 한정하기 위해서는 limiting adder 연산이 요구된다. limiting adder를 적용할 경우 BM값의 표현 비트수 n 은 m 과 p 에 의해서만 결정된다.

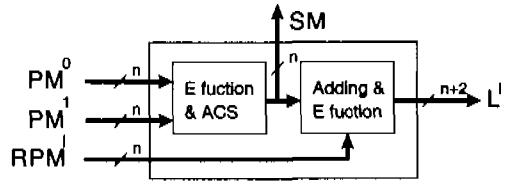
PMC를 문헌[4]에 설명된 바와 같이 그림 5-b)와 같이 구성하면 PM값의 표현 비트수는 n 비트로 제한할 수 있다. 그림 5-c)의 LLRC는 PM으로부터 SM을 구하고 비트 i 에 대한 reverse PM(RPM^i)을 입력받아 비트 i 에 대한 LLR L^i 을 구하는데, 이 과정에서 문헌[4]에 설명된 바와 같이 2비트가 더 요구된다. 따라서 L^i 는 총 $n+2$ 비트로 표현되어야 한다. 그러나 k 번째 비트에 대한 최종 LLR값, $Z_k = L_k^0 - L^1$ 은 n 비트로 제한되어 표현되므로 BM, PM, SM, LLR값의 비트수 n 은 m 과 p 가 결정하게 된다.



a) BMC 회로도



b) PMC 회로도



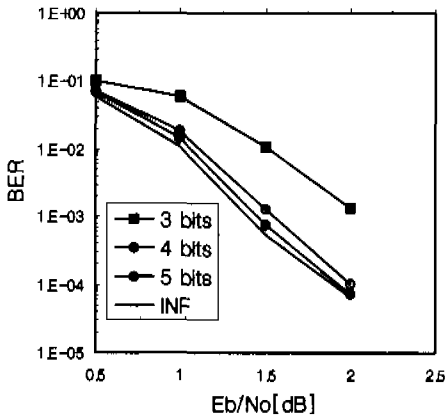
c) LLRC 회로도

그림 5. 주요 구성 요소에 대한 회로도

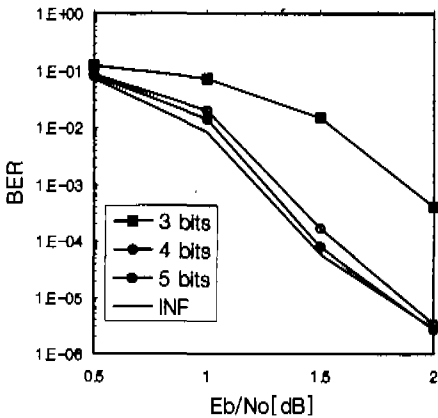
따라서 X_k, Y_k 에 대한 적정 양자화 비트수의 결정과 채널 신뢰도 L_c 의 처리과정은 Log-MAP 방식의 Turbo 복호기의 H/W 구현에 있어서 매우 중요한 요소가 된다.

그림 6은 X_k, Y_k 의 양자화 비트수에 따른 복호성능을 나타낸 것이다. 여기서 X_k, Y_k 의 양자화 범위는 $[-1.5 \sim 1.5]$ 이고 L_c 는 5비트로 표현되었으므로 BM, PM, SM, LLR값의 비트수 $n=m+5+1$ 이다. 시뮬레이션 프로그램은 위에서 서술한 기본 모듈들(BMC, PMC, LLRC) 내에서의 동작에 근거하여 작성되었다. 여기서 L_c 의 표현 비트수 p 를 줄이게 되면 성능은 더욱 열화될 것이므로 X_k, Y_k 를 최소 4비트 이상으로 양자화해야 함을 그림 6에서 알 수 있다.

L_c 의 표현 비트수 p 를 결정하기 전에 Turbo 복호를 적용할 필요가 있는 low SNR 범위에서의 채널 신뢰도값을 살펴볼 필요가 있다(그림 7 참조).



a) $g1/g2=7/5$



b) $g1/g2=13/15$

그림 6. 양자화 비트수에 따른 성능 [iteration=10,N=1000]

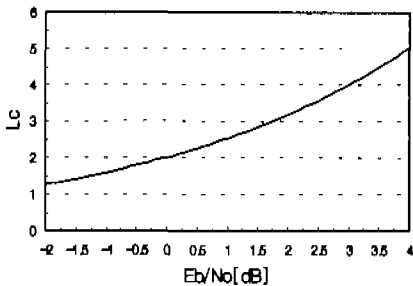


그림 7. low SNR 범위에서의 채널 신뢰도값

low SNR 범위에서의 L_c 값에 대한 이산치값을 {1,2,4}중의 하나로 딱하게 되면, bit-shifting을 이용하여 다음과 같이 곱셈연산을 대신할 수 있다.

$$D_k^m = -L_c \times (X_k + Y_k C_k^m) \approx C_2 [(X_k < 1) + (Y_k < 1) C_k^m]$$

여기서 $C_2[\cdot]$ 는 2보수를 취하는 함수를 의미하고 X_k, Y_k 는 문헌[4]에서와 같이 2의 보수로 표현된다고 가정하였다. 이해를 돕기 위해 그림 8에 $m=5$ 비트인 경우 3비트 bit-shifting 연산을 가정하여 bit-shifting으로 곱셈연산을 대체하는 방식을 나타내었다. 여기서는 이산치 $L_c=4$ 로 가정하여 2비트 shifting하는 경우이다.

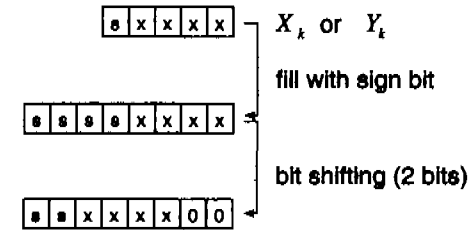


그림 8. bit-shifting에 의한 곱셈의 대체

$-L_c X_k$ 연산결과를 저장할 8비트의 메모리에서 MSB(Most Significant Bit) 3비트를 X_k 의 부호비트로 채우고 이산치 L_c 값에 따라 0,1 또는 2비트를 shifting한다. shifting된 결과에 2의 보수를 취하면 $-L_c X_k$ 의 연산결과를 얻을 수 있다. 예를들어 L_c 의 이산치값이 2이고 X_k 의 양자화값이 각각 -12와 12일때, $-L_c X_k$ 의 연산은 다음과 같이 수행된다.

$X_k = -12$ 일 경우

$$\begin{aligned} X_k &= \boxed{1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0} \\ \text{sifting 후} &= \boxed{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0} \\ \text{2보수 연산 후} &= \boxed{0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0} \\ &= 24 \end{aligned}$$

$X_k = 12$ 일 경우

$$\begin{aligned} X_k &= \boxed{0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0} \\ \text{sifting 후} &= \boxed{0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0} \\ \text{2보수 연산 후} &= \boxed{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0} \\ &= -24 \end{aligned}$$

Log-MAP 방식의 Turbo 복호시 곱셈연산은 가지 메트릭 계산과정에서만 요구되나, 수행되는 곱셈연산의 횟수를 고려해보면 부호기 메모리 수, 인터리버 크기, 반복복호횟수를 각각 ν, N, I 라 할 때,

MAP 복호기 1개에 대해서 총 $2^v \cdot N \cdot I$ 번의 곱셈 연산이 수행되어야 하고, 내부 MAP 복호기의 수가 2일 경우에는 총 $2^{2v+1} \cdot N \cdot I$ 번의 곱셈연산이 수행되어야 한다. 곱셈횟수가 과다하기 때문에 곱셈기물 사용하여 채널 신뢰도를 부과하는 방식은 H/W의 복잡성과 연산속도를 고려할 때 바람직하지 못하다 하겠다. 따라서 본 논문에서 제시한 bit-shifting 방식을 적용했을 때 복호성능이 크게 열화되지 않는다면 bit-shifting으로 곱셈연산을 대체하는 것이 바람직하다. 제안한 방식을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 9에 나타내었다.

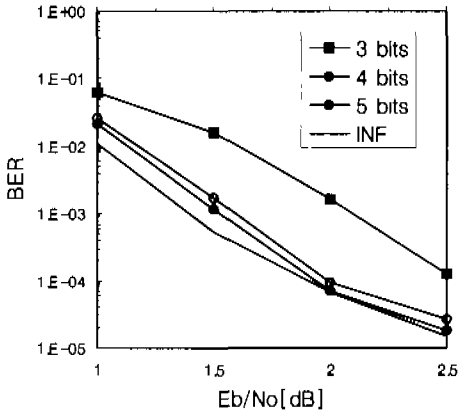
비트수는 적용하는 Turbo 부호의 세부사항에 의존하기 때문에 부호율과 인터리버 크기가 달라지면 새로 결정되어야할 설계 파라메타이지만, bit-shifting을 적용하여 곱셈연산을 대신할 수 있음을 그림 9로부터 확인할 수 있다.

III. 잡음분산평가에러의 영향

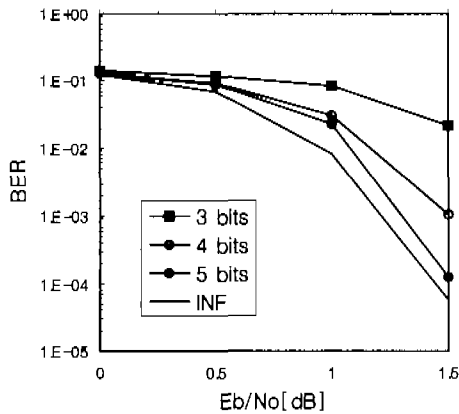
Log-MAP 방식의 Turbo 복호기가 최적으로 설계되었다할지라도 채널 신뢰도값 L_c 가 잘못 추정되면 복호성능에 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 L_c 추정에러가 복호성능에 미치는 영향을 고려하고 L_c 추정에 대한 적정범위를 논한다. 그림 9는 잡음평가에러를 가로축으로 하여 $N=3000$ 인 $g1/g2 = 7/5$ 및 $g1/g2=13/15$ 부호기에 대해 Sub-MAP 방식과 Log-MAP 방식으로 iteration=7회 하여 복호한 경우의 BER 값을 도식한 것이다. 여기서 σ 를 채널 잡음의 표준편차, σ^2 을 평가에러를 포함하는 표준편차라 정의하면 가로축의 인덱스 x 는 σ^* 가 $\sigma^* = x \times \sigma$ 만큼의 평가에러를 포함하고 있음을 의미한다. 그리고 범례의 판호안 수치는 E_b/N_0 [dB] 값을 의미한다.

그림 10에서 알 수 있듯이 σ^* 이 $[\sigma/1.9 \sim 1.2\sigma]$ 의 범위를 벗어나 평가된 경우에는 SNR estimator가 필요없는 Sub-MAP 방식의 Turbo 복호시보다 오히려 성능이 나빠짐을 알 수 있다. 따라서 채널 신뢰도 값 $L_c = 2/\sigma^2$ 를 추정할 때 최소한 σ^* 이 $[\sigma/1.9 \sim 1.2\sigma]$ 의 범위내에 있도록 하여야할 것이다. 또한 σ^* 이 실제 σ 에 비해 크게 평가되었을 경우에는 급작스런 성능열화가 초래될 수 있으므로 가능한한 σ^* 를 σ 보다 다소 작게 유지할 필요가 있다.

본 논문에서 제안한 bit-shifting 방식을 적용하는 경우에는, L_c 값을 {1,2,4}로 이산화시키므로 실제 L_c 값과 이산치 L_c 값의 차이로 인한 오차가 발생하게 된다. 가장 극단적인 두 경우를 살펴보면, $E_b/N_0 = 1.8$ [dB]에서 $L_c = 3.03$ ($\sigma = 0.812$)인데 {1,2,4} 중의 하나로 이산치를 취하게되면 이산치 $L_c = 4$ ($\sigma^* = 0.707$)가 된다. 여기에서 발생하는 오차를 잡음평가에러로 환산하면 $\sigma^* = \sigma/1.15$ 이 된다. 이 경우에는 그림 10에서 예측할 수 있듯이 큰 성능열화는 없게된다. 한편, $E_b/N_0 = 1.7$ [dB]에서 $L_c = 2.965$ ($\sigma = 0.821$)인데 {1,2,4} 중의 하나로 이산치를 취하게 되면 이산치 $L_c = 2$ ($\sigma^* = 1$)가 된다. 이 오차를 잡음



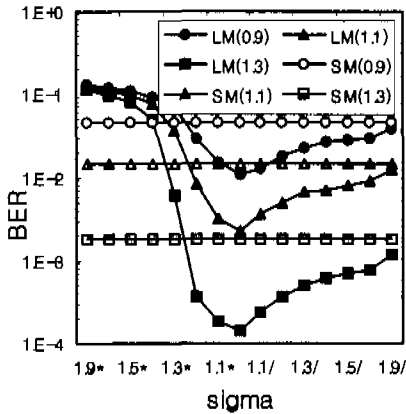
a) $g1/g2=7/5$



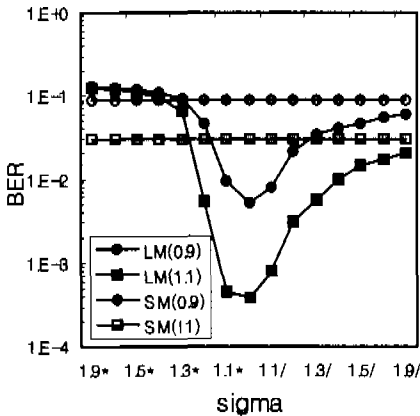
b) $g1/g2=13/15$

그림 9. 제안한 방식으로 구한 오류성능[iteration=10, N= 1000]

본 방식을 부호율 1/2이고 인터리버 크기가 1000 인 Turbo 부호에 적용할 경우, X_k, Y_k 를 5비트로 양자화하면 성능에 큰 열화없이 bit-shifting으로 곱셈연산을 대체할 수 있다. X_k, Y_k 의 최적 양자화



a) $g1/g2=7/5$



b) $g1/g2=13/15$

그림 10. 잡음평가에러에 따른 부호성능

평가에러로 환산하면 $\sigma = 1.22 * \sigma_i$ 이 된다. 이 경우에는 그림 10에서 예측할 수 있듯이 큰 성능효과가 초래될 가능성이 있다. 따라서 bit shifting 방식적용을 위해서 L_c 를 이산화시킬 경우에는 다음과 같이 균일 양자화가 아닌 비균일 양자화를 적용하는 것이 바람직할 것이다.

균일 양자화 :

$$discrete L_c = \begin{cases} 1 & \text{for } L_c < 1.5 \\ 2 & \text{for } 1.5 \leq L_c < 3.0 \\ 4 & \text{for } 3.0 \leq L_c \end{cases}$$

비균일 양자화 :

$$discrete L_c = \begin{cases} 1 & \text{for } L_c < 1.35 \\ 2 & \text{for } 1.35 \leq L_c < 2.68 \\ 4 & \text{for } 2.68 \leq L_c \end{cases}$$

그림 11은 양자화 방식에 따른 σ/σ_i 값의 변화를 도시한 것이다. 비균일 양자화를 적용하면 σ 가 $[1.15\sigma \sim \sigma/1.2]$ 범위내로 국한되므로 L_c 양자화 오차에서 초래될 수 있는 급격한 성능열화를 방지할 수 있다.

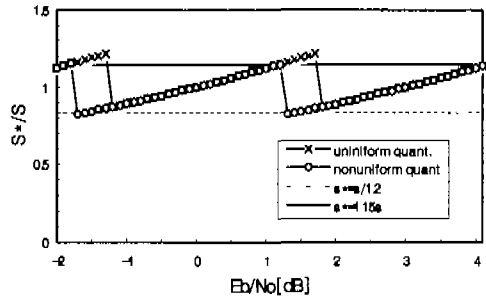


그림 11. 양자화 방식에 따른 σ/σ_i 값의 변화

V. 결론

본 논문에서는 Log-MAP 방식의 Turbo 복호기 구성을 간단화하기 위하여, bit-shifting 방식으로 채널 신뢰도값을 효과적으로 부과할 수 있음을 보였다. 이 경우, X_k, Y_k 의 양자화 비트수는 Turbo 부호의 구성요소들에 따라 달리 설계되어야 하지만, 부호율이 1/2이고 인터리버 크기가 1000인 Turbo 부호에 대해서는 5비트로 X_k, Y_k 를 표현하고 bit-shifting 방식을 적용하면 큰 성능열화없이 곱셈 연산을 효율적으로 대체할 수 있음을 보였다. 곱셈 연산에 소요되는 시간을 감소시키고 하드웨어의 복잡성을 줄이기 위해서는, 본 논문에서 검토한 bit-shifting 방식과 같은 보다 효과적인 방식들이 시급히 연구되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] C.Berrou, A.Glavieux, and P.Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes," in Proc. ICC93, pp.1064-1070.
- [2] D. Divsalar and F. Pollara, "Serial and Hybrid Concatenated Codes with Applications," Proceedings of the International Symposium on Turbo Codes & Related Topics, Sep. 1997, pp.80-87.

