

터보 TCM을 위한 지연 감소된 효율적인 반복 복호 제어 기법

*김남경, *김정수, **김순영, *이문호
*전북대학교 정보통신공학과, 정보통신연구소
**한국통신 인재개발원

Effetive delay reduced control method of iterative decoding for Turbo TCM

*Nam-kyung Kim, *Jeong-Su Kim, **Soon Young Kim, *Moon Ho Lee
*Dep. of Inform. & Comm. Eng. Institute of Inform. and Comm. Chonbuk National Univ.
**Korea Telecom HRDC
E-mail : moonho@chonbuk.ac.k

요약 - 본 논문에서는 터보 TCM(Turbo Trellis Coded Modulation)에서 복호기 입력전에 수신데이터를 이용하여 SNR을 추정하고, SNR에 따라 요구하는 성능을 만족하는 반복 복호수를 적응적으로 복호기 앞단에서 미리 설정하는 반복복호 제어기법을 제안한다. 성능분석결과 최대 반복 복호를 수행했을 때와 비교하여 성능 감소 없이 평균 반복 복호수를 줄일 수 있었다. 따라서 제안구조는 터보 TCM의 복호화 과정에서 문제점 중 하나인 복호 계산량과 지연을 성능 저하 없이 효율적으로 감소시킬 수 있다

1. 서론

채널 에러측면에서 부호화한 출력과 입력을 인터리빙하여 변형된 출력을 동시에 전송함으로써 이중의 부가 정보를 주어 Shannon의 성능한계에 근접하는 우수한 성능을 나타내는 Turbo Codes와 대역폭 효율을 증대시키기 위한 고차 변조기술(8-PSK, 16-QAM 등)을 적용한 방식이 터보 TCM이다[1][4].

터보 코드는 주로 이진 변조기술을 사용하는 방향으로 연구되어 왔다. 따라서 많은 사용자를 수용하는 이동통신 환경 등에서는 대역폭의 증가가 필수적이므로 대역폭이 제한된 환경에서 이진 터보코드를 사용하는 데는 제약이 따른다. 이를 충족하기 위해 터보코드에 다치(multi-level) 변조기술을 결합하여 대역폭 효율과 부호이득을 동시에 만족하는 기술이 Turbo TCM 이다.

터보 TCM의 복호화 과정에서 반복복호 횟수를 증가

하면 성능이 향상되지만 반복 복호수가 증가할수록 복호를 위한 계산량과 지연이 증가하게 된다는 단점을 가지게 된다. 또한 복호화 과정에서 어느 정도의 반복 복호수 이상에서는 성능 향상이 거의 나타나지 않는다. 따라서 반복복호수의 효율적인 제어가 필요하게 된다.

본 논문에서는 복호기 입력전의 수신데이터를 이용하여 SNR(Signal Noise Ratio)를 추정하고, 추정된 SNR에 따라서 요구하는 성능을 만족하는 반복 복호수를 적응적으로 복호기 앞단에서 미리 설정하는 반복복호 제어기법을 제안한다. 이 방법은 각 프레임에서 반복 복호할 때마다 어떤 기준값을 계산해야 하는 복잡도와 지연을 프레임마다 한번만 계산함으로써 효과적으로 줄일 수 있다.

2. 터보 TCM의 반복복호

그림 1은 터보 TCM의 디코더 구조를 보여준다[4]. 하나의 디코더로부터 다른 디코더를 통과하는 정보의 특성의 차이를 제외하고는 이진 Turbo Codes와 유사하다. 디코더에서 '*'는 평처링된 심벌을 의미한다. 중요한 특징은 잡음이 parity 성분뿐 아니라 systematic 성분에 영향을 주기 때문에 systematic 정보와 extrinsic 정보는 분리될 수 없다. 즉, 이진 터보코드와 달리, systematic 정보는 심벌단위로 parity 정보와 함께 전송되어진다. 여기서 각 디코더를 통과한 성분은 두 가지로 나타낼 수 있는데 하나는 a priori 정보와 다른 하나는 분리될 수 없는 extrinsic과 systematic 정보로 나타낼 수 있다.

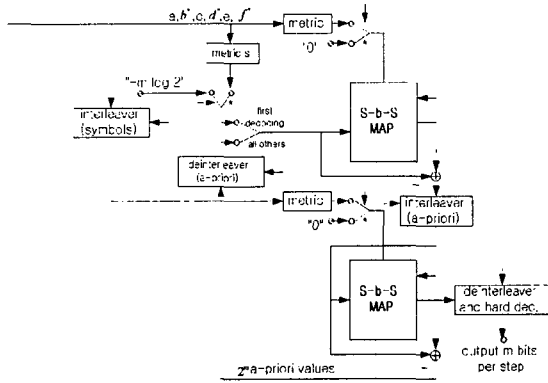


그림 1. Turbo TCM 복호기

MAP 알고리즘은 잡음이 섞인 수신 신호로부터 APP (*a posteriori probability*)를 계산하는 알고리즘이며 APP를 산출하는 원리는 다음과 같다. MAP 복호기의 입력이 다음과 같이 AWGN 채널을 통과한 잡음 데이터 복소수 열 $R_{1,N} = r_k$ ($k = 1, 2, \dots, N$)로 정의하면 MAP 알고리즘의 목적은 주어진 $R_{1,N}$ 에서 most likely 한 수신신호를 발견한 것인데 이것은 LLR(Log Likelihood Ratio) L 값에 대응하는 각각의 d_k 를 계산함으로써 얻어질 수 있으며 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$L(d_k) = \log \frac{\sum_m \alpha_k^i(m) \beta_k^i(m)}{\sum_m \alpha_k^0(m) \beta_k^0(m)} \quad (1)$$

여기서 d_k 는 입력 심벌이고, $i \in 0, 1, \dots, 2^M - 1$, 상태수 $m = 0, 1, \dots, 2^v - 1$ 이다.

$$\alpha_k^i(m) = \sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \alpha_{k-1}^j(m') \gamma_{i,j}(r_k, m, m') \quad (2)$$

$$\beta_k^i(m) = \sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \beta_{k+1}^j(m') \gamma_{j,i}(r_{k+1}, m', m) \quad (3)$$

$$\gamma_{i,j}(r_k, m, m') = P(r_k | d_k = i, S_k = m, d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') \cdot P(d_k = i, S_k = m | d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') \quad (4)$$

여기서, S_k 는 k 인 순간에 부호기의 상태를 의미한다. 심벌이 보내졌을 때 부호기의 현재의 상태와 현재입력에 의존하고 r_k 가 보내진 신호에 의존하기 때문에 식 (4)의 첫 번째 부분은 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$P(r_k | d_k = i, S_k = m, d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') = P(r_k | d_k = i, S_k = m) \quad (5)$$

만약 입력이 독립적이고, i 가 상태 m 에서 m 으로 천이했을 때 식 (4)의 두 번째 부분은 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$P(d_k = i, S_k = m | d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') = P(d_k = i) \quad (6)$$

만일 m 상태에서 m 으로 천이가 이루어지지 않을 때는 식 (7)과 같다.

$$P(d_k = i, S_k = m | d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') = 0 \quad (7)$$

결과적으로, 식 (4)의 두 번째 부분은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(d_k = i, S_k = m | d_{k-1} = j, S_{k-1} = m') = P(d_k = i) \delta(i, m, m') \quad (8)$$

$$\delta(i, m, m') \equiv \begin{cases} 1 & m' \rightarrow m \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

여기에서, $m' \rightarrow m$ 는 심벌 i 가 부호기로 입력되었을 때, 상태 m' 에서 상태 m 로의 천이를 의미한다.

식 (1)을 α, γ 의 정의로, LLR로 MAP에 대한 수식으로 표현하면 다음 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$L(d_k) = \log \frac{\sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \alpha_{k-1}^j(m')}{\sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \alpha_{k-1}^j(m')} \cdot \frac{P(r_k | d_k = i, S_k = m) P(d_k = i) \delta(i, m, m') \beta_k^i(m)}{P(r_k | d_k = 0, S_k = m) P(d_k = 0) \delta(0, m, m') \beta_k^0(m)} \quad (9)$$

여기에서, $P(d_k = l)$ 는 m, m', j 에 의존하지 않는다.

$$L^i(d_k) = \log \frac{P(d_k = i)}{P(d_k = 0)} + \log \frac{\sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \alpha_{k-1}^j(m') P(r_k | d_k = i, S_k = m)}{\sum_m \sum_{j=0}^{2^M-1} \alpha_{k-1}^j(m') P(r_k | d_k = 0, S_k = m)} \cdot \frac{\delta(i, m, m') \beta_k^i(m)}{\delta(0, m, m') \beta_k^0(m)} \quad (10)$$

식 (10)에서 r_k 는 독립적으로 systematic과 패리티 부분을 분리시킬 수 없다. 즉, $P(r_k | d_k = i, S_k = m)$ 은 두 개의 확률로 분리시킬 수 없다. 이것을 식 (11)과 같이 요약할 수 있다.

$$L'(d_k) = L_{P_i} + L_{e \& s_i} \quad (11)$$

3. 제안하는 반복 복호수 제어기법

터보 TCM 복호화 과정에서 반복 복호수에 따른 계산량과 지연을 효과적으로 줄이는 방법을 제안한다. 이 방법은 먼저 Todd A. Summers가 제안한 방법[3]으로 SNR을 추정한다. 수신데이터 값으로 SNR을 추정하고, 모의실험을 통해 이미 얻어진 결과를 저장한 look up table을 이용하여 요구하는 성능을 만족하는 반복 복호수를 가변적으로 미리 설정함으로써 계산량과 지연을 효율적으로 감소시킬 수 있다.

수신데이터를 이용하여 SNR 추정 방법은 다음과 같다. 터보 부호는 AWGN 채널에서 최소 에러를 만들어 내는 채널 상태 정보(입력잡음분산)에 의존한다. 만약 수신된 데이터가 복호기 입력 전에 채널 상태 값을 정확히 알 수 있다면 복호기 입력 전에 요구하는 성능을 만족하도록 반복 복호수를 미리 설정하면 계산 복잡도를 줄일 수 있을 것이다. 그러나 대부분의 연구 결과들은 채널 상태 정보를 정확히 알고 있다는 가정하에 결과를 나타낸다. 채널 상태 정보를 추정하는 연구 결과들이 몇 가지 있다. 그러나 이와 같은 연구 결과들은 독립적으로 이루어 졌으며 위에서 언급한 두 가지 방법(SNR 추정방법과 적응적 정지 기준 구조)을 접목한 연구 결과들은 발표되지 않았다. 연구 결과 중 관심을 갖는 결과는 Todd A. Summers의 추정된 SNR의 영향과 정확한 잡음분산 추정을 위한 방법이다. 여기서 적용한 수신단에서 SNR을 추정하는 방법은 다음과 같다.

AWGN 채널에서 수신된 데이터는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$r_n = \pm\sqrt{E_s} + n_n = \pm\mu + n_n \quad (12)$$

n_n 은 평균은 0이며 분산은 $\sigma^2 = N_o/2$ 인 가우시안 잡음이다. 또한 식에서 심볼 에너지와 비트당 에너지의 관계는 $E_s = E_b R$ 과 같으며, R 은 부호율을 나타낸다. 식(12)에서 SNR을 추정하기 위해 곱의 평균과 절대값의 평균을 고려하면 다음 식과 같다.

$$E(r_n^2) = E_s + \sigma^2 \quad (13)$$

$\beta = \mu^2/\sigma^2 = 2E_s/N_o$ 를 나타내며 평균값의 비를 변수 z 라 정의하면 다음 식과 같다.

$$z = E(r_n^2)/[E(|r_n|)]^2 \quad (14)$$

위 식에서 얻어진 z 를 이용하여 다음식에서 β 를 구한다. 다음 식 (15)은 z 와 β 와의 관계를 2차 방정식으로 풀어 얻어진 결과 식이다.

$$\beta \approx 4.81 \times 10^{-6} \times z^2 - 63.5593 \times z + 72.9894 \quad (15)$$

가변적으로 반복 복호수를 복호기 입력전에 미리 설정하기 위해서는 성능 감소가 거의 없는 최적의 반복 복호수를 설정하는 것이 필요하다.

그림 2는 각 SNR에서 반복 복호수에 따른 BER 성능을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 반복횟수가 증가하면 성능은 향상 되지만 어느 정도의 반복 복호 이상에서는 성능의 향상이 에러마루 현상이 나타나서 반복복호를 계속 진행하여도 더 이상의 성능향상은 미미해짐을 알 수 있다. 따라서, 각 SNR에 따라 반복복호 횟수를 가변적으로 미리 설정하면 성능감소를 최소화 하여 반복복호 횟수를 줄일 수 있게 된다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 SNR 추정에 의한 반복 복호수 preset 구조를 보여준다. 그림에서 나타나듯이 반복 복호 제어가 간단하게 이루어진다.

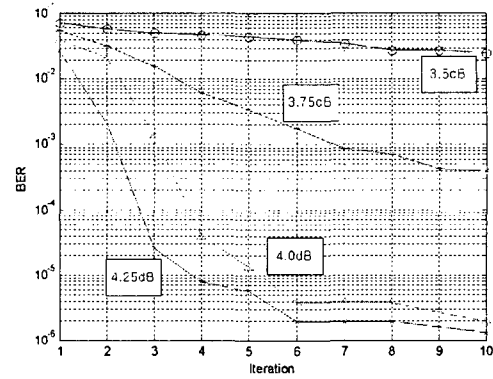


그림 2. 각 SNR에서 반복 복호수에 따른 BER 성능

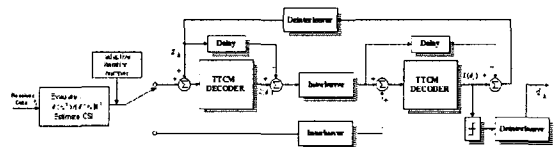


그림 3. SNR 추정에 의한 반복 복호수 preset 구조

4. 시뮬레이션 결과 분석

반복복호 정지기준 방법에 대하여 성능을 분석한다. 제안하는 SNR 추정에 의한 반복 복호수 preset 구조인

블록도 그림 3에 따라서 시뮬레이션을 수행한다.

그림 4는 구속장 크기가 4, 프레임 크기가 5000, 랜덤 인터리버를 사용한 8PSK 터보TCM의 BER 성능 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 반복복호 횟수가 증가하면 터보TCM의 성능이 향상 됨을 알 수 있다. 그림 5는 프레임 크기가 10240, 랜덤 인터리버를 사용한 8PSK 터보TCM에서 본 논문에서 제안하는 반복복호 제어 기법의 성능을 비교하기 위해 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 반복복호 횟수인 7회를 수행할 경우가 성능이 가장 우수하고, 제안 기법을 적용한 터보TCM의 성능은 고정적으로 3회 반복복호를 수행한 경우에 비하여 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 반복복호 횟수를 비교한 표 1.에서 나타난 것과 같이 제안기법의 평균 반복 복호수는 E_b/N_0 에 따라서 다르지만 전체적으로는 약 3회 정도가 된다. 따라서 그림 5에서 비교할 수 있듯이 제안 기법은 같은 반복 수에 비하여 성능 향상을 기대할 수 있고, 또한 반복 횟수변에서 반복복호 제어기법을 적용하여 반복수를 줄임으로써 계산량과 복호 지연을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

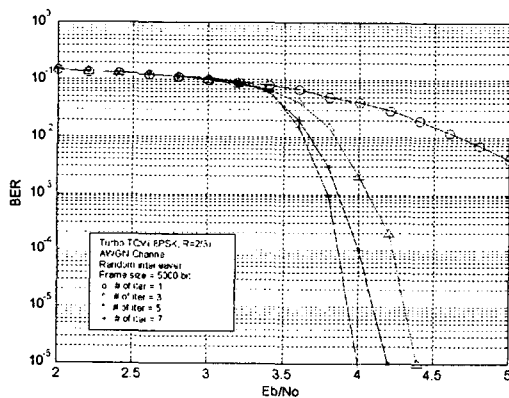


그림 4. 반복 복호수에 따른 BER 성능

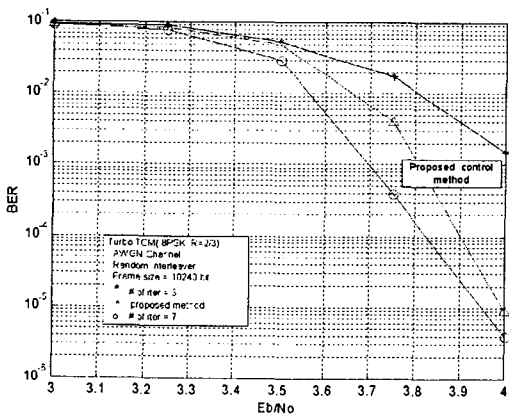


그림 5. 제안기법의 반복 복호수에 따른 BER 성능

표 1. 추정된 SNR과 평균 반복복호수 비교

True E_b/N_0	추정된 E_b/N_0	평균 반복 복호수 (제안된 기법)	고정된 반복 복호수
3	2.956717	5.679000	7
3.25	3.242404	4.674000	7
3.5	3.517838	3.579000	7
3.75	3.792110	2.469000	7
4.0	4.054433	1.406000	7

5. 결론

본 논문에서는 Turbo Codes TCM의 복호화 과정에서 반복복호 횟수를 효율적으로 감소 시키는 제어 기법에 관하여 연구하였다.

제안기법은 복호기 입력전에 수신데이터를 이용하여 SNR을 추정하고 추정된 SNR에 따라서 요구하는 성능을 만족하는 반복 복호수를 적응적으로 복호기 앞단에서 미리 설정하는 반복복호 제어기법이다. 이 방법은 각 프레임에서 반복 복호할 때마다 어떤 기준값을 계산해야 하는 복잡도와 지연을 프레임마다 한번만 계산함으로써 효과적으로 줄일 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 성능 분석 결과 최대 반복 복호를 수행했을 때와 비교하여 성능 감소 없이 평균 반복 복호수를 효과적으로 줄일 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi and F. Pollara, "Serial concatenated trellis coded modulation with iterative decoding: design and performance," *Proc. IEEE Glob. Comm. 97*, pp.38-43, 1997.
- [2] Soonyoung Kim, Jinsu Chang, Moon Ho Lee, Simple Stop Criterion of Iterative Decoding for wireless Packet Transmission, *IEE Electronics Letters*, Vol.36 No.24, pp.2026~2027, November, 2000.
- [3] Todd A. Summers and Stephen G. Wilson, SNR Mismatch and Online Estimation in Turbo Decoding," *IEEE Transactions on Communication*, Vol. 46, No. 4, pp 421-423, April 1998.
- [4] P. Robertson, T. Wörz, "Bandwidth-Efficient Turbo Trellis-Coded Modulation Using Punctured Component Codes," *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, VOL. 16, NO. 2, FEBRUARY 1998.
- [5] 이문호, 김순영, 오류정정이론-터보코드의 기본 원리와 응용, 영일, 2001