

광대역 다중경로 채널에서 터보부호를 적용한 W-CDMA 시스템의 성능 분석

윤성재^o, 조성철, 김철성
전남대학교 컴퓨터공학과, RRC

W-CDMA Systems Using Turbo Code over Wideband Multipath Channel

Sung-Jae Yoon^o, Seong-Chul Cho, Cheol-Sung Kim
Dept. of Computer Engineering, RRC, Chonnam National University

Abstract

In this paper, we analyze the performance of W-CDMA systems using turbo code in the wideband multipath channel. The strength of each multipath component is assumed to be Rayleigh distributed. Turbo codes of long block sizes have been known to show very good performance in a AWGN channel. Recently, turbo codes of short block sizes suitable for real time communication systems have attracted a lot of attention. Thus, in this paper we consider the turbo code of 1/3 code rate and short frame size of 192 bits in wideband mobile multipath channel. We analyze the performance of W-CDMA systems with 10MHz bandwidths in the case of employing RAKE receiver with not only MRC diversity but also turbo code.

1. 서론

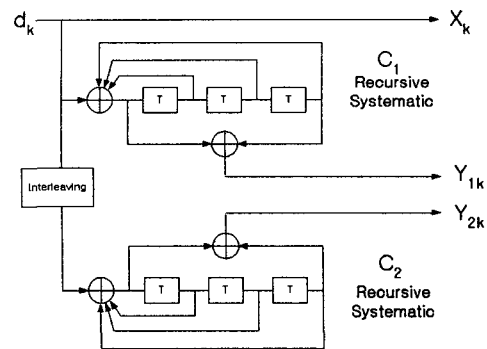
무선 이동통신 시스템에서 페이딩 채널의 특성으로 인하여 발생하는 비트 오류를 정정하기 위해 사용되는 채널 코딩은 통신 신뢰도를 개선시키는 매우 중요한 기법이다. 이러한 이동통신 시스템에 사용되는 채널 코딩 기법은 길쌈부호등 여러 가지가 있는데 최근들어 터보 부호가 그 우수한 성능으로 인하여 많은 관심의 초점이 되고 있다[1][2][3].

Berrou 등에 의해 제안된 터보부호는 AWGN 채널 상에서 인터리버 크기가 큰 경우에 Shannon 한계에 근접하는 우수한 성능을 나타낸다고 알려져 있다[1]. 이런 강력한 코딩 기법을 무선 통신 시스템에 적용하기 위하여 근래에 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며 Rayleigh 페이딩 채널에서도 터보부호의 우수한 성능이 입증되고 있다[2].

따라서 본 연구에서는 IMT-2000과 같은 제3세대 무선 통신 시스템을 유연성있게 지원할 수 있는 광대역 CDMA (W-CDMA) 방식에 짧은 프레임 사이즈를 갖는 터보부호를 적용하여 W-CDMA 방식의 성능을 분석하고자 한다.

2. 터보 부호기

본 논문에서 사용된 터보 부호기는 [그림1]에 보여지는 것처럼 두개의 RSC (Recursive Systematic Convolutional) 코드와 인터리버로 구성된다. 각 부호기는 인터리버를 사이에 두고 병렬로 연결되어 있으며 동일한 정보 비트열을 각각 부호화 한다.



[그림1] 터보 부호기

터보부호는 인터리버의 길이가 증가할수록 우수한 성능을 발휘하게 되는데[3], 이때 지연이 증가하게 되는 단점이 있다. 따라서 음성통신과 같이 실시간 처리가 중요시되는 경우에는 인터리버의 길이, 즉 성능과 지연 사이에 적절한 조화가 필요하게 된다. 본 연구에서는 실시를 갖는 터보부호의 성능을 고찰한 통신 시스템에 적절한 짧은 프레임 사이즈하기 위하여 192비트를 하나의 블록으로 하는 랜덤 인터리버를 사용하였다.

[그림1]에서 살펴보면, 입력 정보 비트와 동일한 시스태틱 비트와 각각의 부호기로부터 출력되는 패리티 비트로 인하여 1/3 코드가 된다. 좀더 면밀히 검토해보면, 인터리버 길이를 N이라고 했을 때 입력정보 비트열은

$$d = (d_1 \ d_2 \ \dots \ d_k \ \dots \ d_N), \quad d_k \in \{0, 1\}$$

이고, 부호기의 출력은

$$Y_1 = (Y_{11} \ Y_{12} \ \dots \ Y_{1k} \ \dots \ Y_{1N}), \quad Y_{1k} \in \{0, 1\}$$

$$Y_2 = (Y_{21} \ Y_{22} \ \dots \ Y_{2k} \ \dots \ Y_{2N}), \quad Y_{2k} \in \{0, 1\}$$

이다. Y_2 는 인터리버를 통과한 정보 비트열을 부호화한 것이다. 채널을 통과한 후의 수신된 시퀀스는 $R_1^N = (R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_N)$, $R_k = (x_k, y_k)$ 으로 표현한다. 여기서 x_k 와 y_k 는 부호기의 출력 X_k 와 Y_k 가 변조되어 채널을 통과한 신호를 의미한다.

3. 복호 알고리즘

재귀 반복을 이용해서 낮은 신호대 잡음비에서 매우 뛰어난 오율 성능을 나타내는 터보 부호의 복호기는 LLR(Log Likelihood Ratio)의 부호를 가지고 정보 비트 d_k 를 경관정 한다[1].

$$\hat{d}_k = \text{sign}[L(d_k)] \quad (1)$$

$$L(d_k) = \log \frac{P(d_k = 1 | R_1^N)}{P(d_k = 0 | R_1^N)} \quad (2)$$

Bayes' rule과 Modified Bahl 복호 알고리즘을 이용하여 식(2)를 정리하면 아래와 같다[4].

$$L(d_k) = \log \frac{\sum_m \alpha_k^1(m) \beta_k^1(m)}{\sum_m \alpha_k^0(m) \beta_k^0(m)} \quad (3)$$

$$\alpha_k^i(m) = \delta_i(R_k, m) \sum_{j=0}^1 \alpha_{k-1}^j(S_b^i(m)) \quad (4)$$

$$\beta_k^i(m) = \sum_{j=0}^1 \beta_{k+1}^j(S_f^i(m)) \delta_j(R_{k+1}, S_f^i(m)) \quad (5)$$

$$\delta_i(R_k, m) = \exp\left(-\frac{2}{\sigma^2} (x_k i + y_k Y_k^i(m))\right) \quad (6)$$

그러나 Bahl 알고리즘은 수식적으로 표현하기가 어렵고 지수 계산과 많은 곱셈을 필요로 하므로 실제 구현하기가 불가능하다. 따라서 Bahl 알고리즘을 로 그 영역에서 부분적으로 연산을 수행하여 복잡도는 적으나 성능은 비슷한 Log-MAP 알고리즘을 사용한다.

$$\begin{aligned} xEy &= -\ln(e^{-x} + e^{-y}) \\ &= \min(x, y) - \ln(1 + e^{-|y-x|}) \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)과 같은 E함수를 정의하고, $L(d_k)$ 을 E함수로 표현하면 아래 식(8)~식(10)과 같다.

$$L(d_k) = E[A_k^0(m) + B_k^0(m)] - E[A_k^1(m) + B_k^1(m)] \quad (8)$$

$$A_k^i(m) = D_i(R_k, m) + \sum_{j=0}^1 A_{k-1}^j(S_b^i(m)) \quad (9)$$

$$B_k^i(m) = \sum_{j=0}^1 B_{k+1}^j(S_f^i(m)) + D_j(R_{k+1}, S_f^i(m)) \quad (10)$$

여기서 $A_k^i(m) = \ln\{\alpha_k^i(m)\}$, $B_k^i(m) = \ln\{\beta_k^i(m)\}$, $D_i(R_k, m) = \ln\{\delta_i(R_k, m)\}$ 이다.

식(9)와 식(10)을 살펴보면 식(7)과 같이 간단히 계산되는 E함수와 덧셈으로만 이루어져 있으므로 상당한

계산량을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이렇게 계산된 $L(d_k)$ 은 식(11)과 같이 세 부분으로 나누어 쓸 수 있다.

$$L(d_k) = L_c x_k + L_o(d_k) + L_e(d_k) \quad (11)$$

첫 번째 항에서 $L_c = 4aRE_b/N_0$ 은 채널 신뢰도를 나타낸다. 여기서 R 은 전체 코드율, a 는 페이딩 계수이다. 두 번째 항은 전 복호기에 의해 제공된 정보비트 d_k 의 사전정보이고, 세 번째항은 반복 복호화 과정에서 이득을 가져다 주는 정보로 다음 복호기에 넘겨주는 extrinsic 값이다.

4. 다중경로 채널에서의 W-CDMA

일반적으로 광대역 다중경로 채널은 식(12)과 같이 선형필터로 표현된다.

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \delta(t - \tau_i) e^{j\theta_i} \quad (12)$$

여기서 α_i 은 경로세기, τ_i 은 시간지연, 그리고 θ_i 은 위상천이를 나타낸다[5].

여러 경로들의 위상 θ_i 은 상호 독립적인 랜덤 변수로써 $(0, 2\pi]$ 구간에서 uniform 분포를 갖고 경로세기 α_i 은 Rayleigh 분포를 갖는다고 가정한다.

본 연구에서는 채널 대역폭을 전형적인 10MHz로 가정하고 시스템 대역폭 역시 10MHz인 CDMA 시스템에 대하여 분석한다.

W-CDMA 신호를 해석하기 위해서 수신된 전체 신호는 K개의 DS신호의 합으로 구성되고 각각은 서로 비동기적이라고 가정한다. 또한 코히어런트 BPSK 변조 방식과 완벽한 전력제어와 동기화를 가정한다.

k번째 전송된 신호는 식(13)과 같다.

$$s_k(t) = m_k(t) c_k(t) \exp(jw_0 t) \quad (13)$$

여기서 $m_k(t)$ 와 $c_k(t)$ 는 각각 k번째 사용자의 데이터와 확산코드를 나타낸다. 그리고 전체 수신신호 $r(t)$ 는 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_{k,i} m_k(t - \tau_{k,i}) c_k(t - \tau_{k,i}) \\ &\quad \times \exp[j\{w_0(t - \tau_{k,i}) + \theta_{k,i}\}] + n(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 L은 다중경로 수이고, $n(t)$ 는 가산성 가우시안 잡음을 나타낸다.

원하는 사용자로부터의 신호는 $k=0$, 그리고 $k=1, 2, \dots, K-1$ 은 그 외 사용자들로부터의 신호를 의미한다. 또한 $i=0$ 은 첫 번째 도착한 신호를 그리고, $i=1, 2, \dots, L-1$ 은 그 외의 다중경로 신호들이다. 그리고 $\tau_{k,i}$ 과 $\theta_{k,i}$ 은 k번째 사용자의 i번째 경로의 시간지연과 위상천이를 각각 나타낸다.

t=T에서 전형적인 상관기 출력은 식(15)와 같다.

$$Z = \text{Re} \left[\int_0^T 2r(t)c_0(t) \exp(-(\omega_0 t + \theta_0)) dt \right] \\ \equiv S + I + N \quad (15)$$

여기서 S는 원하는 사용자에 대응하는 상관기 출력이고, I는 간섭성분, 그리고 N은 잡음성분을 의미한다. 원하는 사용자 신호 S의 통계적 특성을 살펴보면, S에 관한 식(16)을 유도할 수 있다[6].

$$S = \left| \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{a}_{0,l} \exp(j\tilde{\phi}_{0,l}) R_c(\tau_{0,l}) \right| \quad (16)$$

경로세기 $\alpha_{0,l}$ 은 Rayleigh 분포를 따른다고 가정하면 신호세기 $\alpha_{0,l}$ 는 $\tilde{a}_{0,l} A e^{-j\delta l}$ 으로 대체하여 식(17)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \left| \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{a}_{0,l} A e^{-j\delta l} \exp(j\tilde{\phi}_{0,l}) R_c(\tau_{0,l}) \right| \quad (17)$$

여기서 $\alpha_{0,l}$ 은 정규화된 Rayleigh 분포의 랜덤 변수이고, A는 $\alpha_{0,l}$ 의 평균치, δ 는 감소 경사도이다. 식(16)과 식(17)에서 \sim 는 랜덤 변수의 표기이다.

모든 다중경로 성분을 이용하기 위해서 최대 결합비의 레이크 수신기를 사용한다고 하면 그때 수신기 출력은 식(18)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_T = S_T + I_T + N_T \quad (18)$$

그리고 수신기 출력의 신호성분인 S_T 의 통계적 특성에 대한 식은 다음과 같이 표현된다[7][8].

$$S_T = \sum_{i=1}^M G_i S_i \quad (19)$$

여기서 G_i 는 신호전압 대 잡음과 간섭 전력의 비로써 i번째 가지의 이득이며, S_i 는 그 가지의 상관기 출력의 신호성분이다. 각각의 S_i 는 식(17)로써 표현할 수 있다.

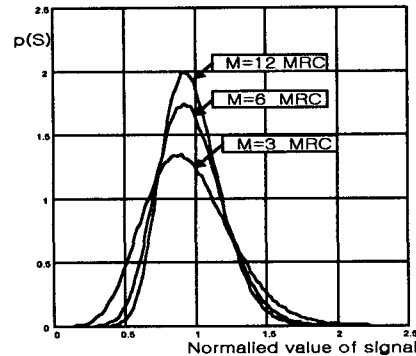
보통 MAI(Multiple Access Interference)는 가우시안으로, 그리고 잡음은 가산성 가우시안 잡음으로 알려져 있다[9][10]. 따라서 식(17)을 이용해 수치적으로 발생시켜서 레이크 수신기를 통과한 다중경로 W-CDMA 수신신호와 가우시안으로 근사된 MAI와 가산성 잡음의 합을 복호기 입력으로 사용한다.

5. 모의 실험

W-CDMA 시스템의 성능평가를 위하여 도심지역 채널 환경에서 10MHz 대역폭을 고려한다. 도심지역 채널환

경은 max. excess delay=2.3[μs], $\delta = 0.3$ 으로 가정한다.

식(17)을 이용하여 S를 수치적으로 발생시킨 후 최대결합비의 레이크 수신기를 통과한 CDMA 신호들의 pdf인 $p(S_T)$ 를 [그림2]에 도시하였다.

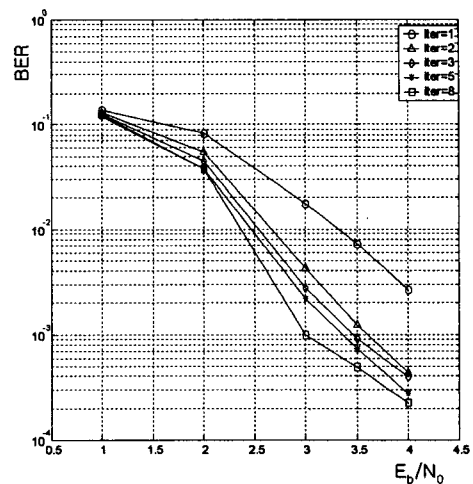


[그림2] 도심지역에서 레이크 수신기의 가지수가 다른 시스템의 수신신호 확률밀도 함수

위에서 구한 Rayleigh 페이딩 채널환경에서의 수신신호를 터보부호에 적용함으로써 다양한 레이크 수신기의 가지수에 따른 성능을 분석하였다.

적용되어진 터보부호는 [그림1]에서 볼 수 있듯이 3개의 메모리를 사용하고, 코드율이 1/3이며 랜덤 인터리버를 사용하였다. 그리고 실시간 통신 시스템에 적합한 터보부호의 성능고찰을 위하여 인터리버의 길이는 192비트로 비교적 짧게 가정하였다.

모의실험에서 터보 복호기는 Log-MAP 알고리즘을 사용하였으며, 레이크 수신기의 가지수 M=3, 6, 12인 각각의 시스템에 터보부호가 적용되었을 때의 비트 오류율 [그림3]~[그림5]에 도시하였다.



[그림3] 가지수 M=3인 시스템의 BER

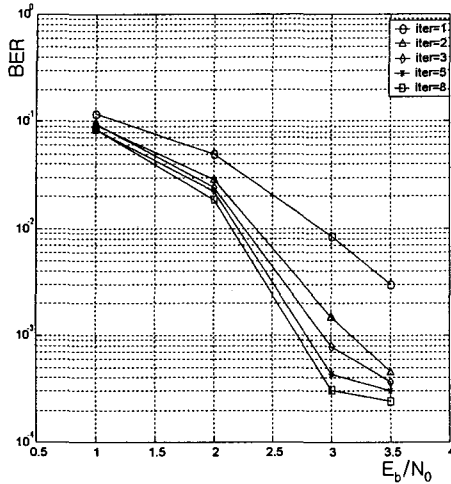
6. 결 론

본 연구에서는 Rayleigh 페이딩 채널모델에서 터보 부호를 적용한 W-CDMA 시스템의 성능을 모의실험을 통하여 분석하였다. 이를 위해 먼저 수신된 CDMA 신호의 통계적인 특성들을 수치적으로 발생시키고, 레이프 수신기 가지수에 따라 각기 다른 이 수신신호를 터보부호에 적용함으로써 반복부호를 수행하면서 그 성능을 도시하였다.

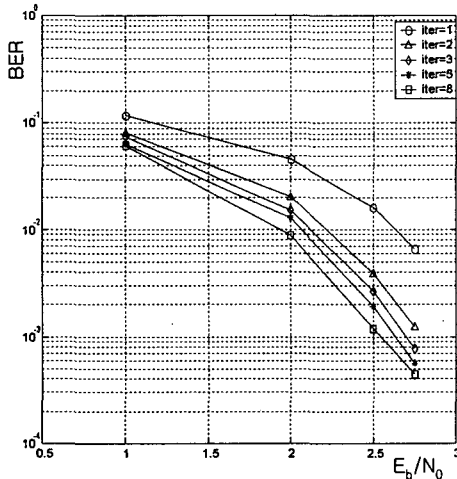
모의실험결과 가지수 $M=3$ 이상인 경우에 2회이상의 반복부호를 수행하기만 하면 신호대 잡음비 3dB 이하에서 원활한 음성통신 품질을 제공할 수 있는 10^{-3} 의 BER을 획득할 수 있음을 확인하였다. 또한 10^{-3} 의 BER에 대하여 $M=3$ 에서 8번의 반복부호를 수행하는 경우와 $M=6$ 에서 3번의 반복부호를 수행하는 경우 동일한 성능을 나타내며, $M=6$, 반복부호 횟수 5인 경우와 $M=12$, 반복부호 횟수 3인 경우 동일한 성능이 나타남을 확인하였다.

7. 참고 문헌

- [1] C. Berrou, A. Glaviex, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding : Turbo-codes," *IEEE ICC'93*, Genoa, Switzerland, vol. 2, pp. 1064-1070, May 1993.
- [2] E. K. Hall and S. G. Wilson, "Design and Analysis of Turbo Codes on Rayleigh Fading Channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. JSAC-16, No. 2, pp. 160-174, Feb. 1998.
- [3] A. S. Barbaulescu and S. S. Pietrobon, "Interleaver Design for Turbo Codes," *Electronics Letters*, vol. 30, No. 25, pp. 2107-2108, Dec. 1994.
- [4] S.S. Pietrobon and A.S. Barbaulescu, "A simplification of the modified Bahl decoding algorithm for systematic convolutional codes," in *Proc., Int. Symp. on Info. Theory and Applications*, Sydney, Australia, pp. 1073-1077, Nov. 1994.
- [5] G. L. Turin et al., "A statistical model of urban radio propagation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-21, pp. 1-9, Feb. 1972.
- [6] Cheol-Sung Kim, Hoon Jeong and Dong-Jin Oh, "Comparison W-CDMA and N-CDMA systems over wideband Rayleigh channel," *Proc. of 10th PIMRC'99*, pp. 1007-1011 Osaka, Japan, Sep. 1999.
- [7] M. D. Yacoub, "Foundations of Mobile Radio Engineering," CRC Press, 1993.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communication*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [9] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase coded spread spectrum multiple access communication -Part I : System Analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, pp. 795-799, Aug. 1977.
- [10] R. L. Pickholtz, D. L. Schilling and L. B. Milstein, "Theory of spread spectrum communications A Tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-30, pp. 855-884, May 1982.



[그림4] 가지수 $M=6$ 인 시스템의 BER



[그림5] 가지수 $M=12$ 인 시스템의 BER

iteration \ branch	2회	3회	5회	8회
M=3	3.60	3.45	3.35	3.00
M=6	3.17	2.98	2.79	2.71
M=12		2.70	2.63	2.55

[표 1] BER 10^{-3} 에서의 branch 개수와 iteration 횟수에 따른 E_b/N_0 (dB)