

다중 경로 레일리 페이딩 채널에서 Turbo 부호를 적용한 Multi-Carrier CDMA 시스템의 성능 분석

박기식*

* 인하공업전문대학 정보통신과

Performance Analysis of Multi-Carrier CDMA System using Turbo Code in Multipath Rayleigh Fading Channel

Ki-Sik Park

* Dept. of Inform. & Comm., Inha Technical College

E-mail : gspark@true.inhatc.ac.kr

요 약

본 논문에서는 다중 경로 레일리 페이딩 채널에서 MC (Multi-Carrier) CDMA 시스템의 BER 성능을 분석하였고, 최근에 가장 강력한 부호화 기법으로 급부상하고 있는 터보 코드를 MC CDMA 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하였다.

성능 해석 결과, 레일리 페이딩 채널에서는 강력한 성능 개선 기법을 적용하지 않는 한 사용자 수와 E_b/N_0 값에 관계없이 음성 서비스를 지원하지 못함을 알 수 있었다. 한편, 터보 코드를 성능 개선 기법으로 적용하면 BER 성능이 매우 개선되고, 사용자 수와 E_b/N_0 값에 관계없이 음성 서비스를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었다. 예를 들어 E_b/N_0 가 10 dB이고 사용자 수가 10명인 경우, 터보 코드를 적용함에 의해 BER 성능이 약 5×10^{-3} 정도 개선됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근 정보화 사회가 가속화됨에 따라 무선 채널을 통한 고속 및 양질의 음성, 데이터, 영상을 동시에 수용할 수 있는 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 급속히 확대되어 가고 있다. 이러한 요구에 부응하여 급속히 진전되는 무선 통신의 기술 발전에 힘입어, 종래의 음성 위주의 무선 통신은 데이터 및 영상을 포함하는 고속의 무선 멀티미디어 통신 시스템으로 발전하고 있다. 미래 이동 통신 시스템은 멀티미디어 통신과 높은 데이터율 (data rate) 전송 등의 다양한 조건을 요구하기 때문에 DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) 시스템을 대체하는 새로운 방식의 시스템이 필요하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 MC (Multi-Carrier) CDMA 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1],[2].

MC CDMA 시스템은 정보 데이터 열들이 확

산 열에 의하여 곱해진 후 M개의 반송파에 의해 신호가 변조된다. 수신부에서는 각 반송파마다 상관기를 사용하며 상관기의 출력은 최대비 합성에 의하여 합성된다. MC CDMA 시스템은 다중 경로 페이딩에 강인하고, 협대역 간섭 억제에 효과적이다. 현재 사용중인 DS-CDMA 시스템은 직렬 방식의 신호 처리와 빠른 전송 속도의 처리를 필요로 하나, MC CDMA 시스템은 대조적으로 병렬식의 신호 처리와 낮은 전송 속도를 요구한다. 이는 낮은 전력을 소비할 수 있는 장비를 사용할 수 있도록 해 준다[3],[4].

본 논문에서는 다중 경로 레일리 페이딩 채널에서 다수의 반송파를 이용하여 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 MC CDMA 시스템의 BER (Bit Error Rate) 성능을 분석하고자 한다. 그리고 멀티미디어 서비스를 지원하기 위해 최근에 가장 강력한 부호화 기법으로 급부상하고 있는 터보 코드를 MC CDMA 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하고자 한다.

2. MC CDMA 시스템 구조 및 해석 모델

그림 1은 k 번째 사용자의 MC CDMA 송신기 구조를 나타낸다. 여기서 $b^{(k)}$ 와 $C_i^{(k)}$ 는 각각 k 번째 사용자의 정보 심볼과 k 번째 사용자의 코드 길이 N인 i 번째 확산 부호를 나타내며, 만일 QPSK 변조 방식이 적용된다면 $i = 0, 1, \dots, N-1$, $b^{(k)} \in \{-1, j, +1, -j\}$ 일 때 $k=0, 1, \dots, K-1$, $C_i^{(k)} \in \{-1, j, +1, -j\}$ 이다. N 개의 직교 부호를 사용함으로써 최대 사용자 수 K는 N과 같아진다.

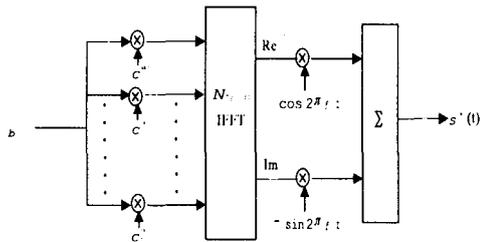


그림 1. MC CDMA 송신기 구조

k 번째 사용자의 m 번째 신호에 대한 복소 기저 신호는 다음과 같이 주어진다[5],[6].

$$s_m^{(k)}(t) = \sqrt{\frac{E_s}{NT_s}} \cdot b_m^{(k)} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^{(k)} e^{j2\pi \frac{i}{N} t} f(t - mT_s) \quad (1)$$

이때, $f(t)$ 는 각 심볼의 파형을 나타내며 다음과 같이 주어진다

$$f(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, T_s 는 심볼 주기로 E_s 는 심볼 당 전송된 에너지이다.

본 논문에서의 시스템 채널 모델은 그림 2와 같다.

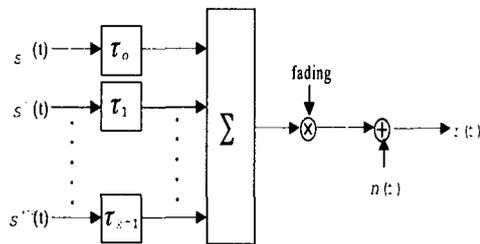


그림 2. 시스템 채널 모델

기지국에서 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현된다[5],[6].

$$r(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} s_m^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \quad (3)$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} s_m^{(0)}(t) + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{K-1} s_m^{(k)}(t - \tau_k) + n(t)$$

여기서, $n(t)$ 는 단측 전력 스펙트럼 밀도 N_0 인 AWGN을 나타내고 τ_k 는 k 번째 사용자 신호의 지연이다. 본 논문에서는 $k=1, 2, \dots, K$ 에 대해 $\tau \equiv 0$ 이고 $0 \leq \tau_k < T_s$ 이며, τ_k 는 iid (independent identically distributed) 랜덤 변수로 가정하였다.

3. 레일리 페이딩 채널에서 MC CDMA 시스템의 성능 해석

본 논문에서는 $k=1, 2, \dots, K$ 에 대해 $S_k \equiv s_m^{(k)}(t - \tau_k)$ 를 iid 랜덤변수로 가정하였다. 멀티캐리어 신호는 분산 $\sigma^2 = (\sqrt{E_s}/NT_s)^2$ 인 N 개의 파형의 합으로 구성되어 있기 때문에, N이 증가하면 파형은 평균이 0이고 분산이 $N\sigma^2$ 인 가우스 분포 형태로 근접한다. 즉, 비동기 MC CDMA 시스템에 대해 다른 사용자의 간섭은 평균이 0이고 분산이 E_s/T_s 인 가우시안 잡음으로 근사화할 수 있다. 총 잡음 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다[5],[6].

$$N' = (K-1) \cdot \frac{E_s}{T_s \cdot W} + N_0 \quad (4)$$

$$= (K-1) \cdot \frac{E_s}{N+1} + N_0$$

여기서, $W = (N+1)/T_s$ 는 총 대역폭이다.

한편, 가우스 잡음 채널에서 MC CDMA/QPSK 신호의 비트 오류율은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{e|MC\ CDMA} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{\frac{2(K-1)}{G_{MC}} + \frac{1}{E_b/N_0}}} \right) \quad (5)$$

여기서, E_b 는 전송 비트 당 에너지이고, $G_{MC} \equiv N$ 은 캐리어의 수를 나타내는데 처리 이득과 동일한 값이다. 레일리 페이딩이 존재하는 채널에서 MC CDMA/QPSK 신호의 비트 오류율은 가우스 잡음 채널에서의 비트 오류율을 레일리 페이딩의 확률 밀도 함수를 이용하여 집합 평균을 취하면 구해지는데 다음과 같다.

$$P_{e\ Rayleigh} = \int_0^{\infty} P_{e\ MC\ CDMA}(\gamma) P_{\text{Rayleigh}}(\gamma) d\gamma \quad (6)$$

$$\text{단, } P_{\text{Rayleigh}}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right),$$

γ ; 순서 SNR,
 γ_0 ; 평균 SNR.

4. Turbo 부호화 기법

그림 3은 터보 코드의 블록 다이어그램을 보여준다.

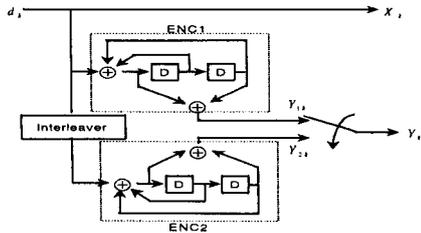


그림 3. 터보 부호기의 블록 다이어그램

문헌 [7]에서 소개된 터보 코드는 단순히 두 개의 RSC (Recursive Systematic Convolutional)를 병렬로 연결하고, 두 부호기 (ENC1과 ENC2)의 출력 시퀀스를 다르게 하기 위해서 두 부호기를 인터리버로 나누어 놓은 형태를 취하고 있다. 데이터 시퀀스가 프레임 단위로 전송된다면 터보 부호기는 메모리가 v 인 두 개의 RSC로 이루어진 블록 코드로써 생각할 수 있다. 또한, RSC 부호기(ENC1)의 모든 상태를 0으로 만들기 위해서 v 개의 정보 비트를 한 프레임 끝에 붙인다. 따라서 두 개의 RSC 사이에 놓인 인터리버 n 은 데이터 프레임과 테일 비트(tail bit) v 가 더해진 길이이다. 이 때, 터보 부호기에서는 시스템 매트릭 시퀀스(systematic sequence)와 패리티 시퀀스(parity sequence)로 구성된 부호 시퀀스로 부호화된다. 또한, 대역 효율을 위해서 패리티 프레임(parity frame)을 펀처링(puncturing)한다. 따라서 그림 3의 터보 부호기의 부호율은 $1/2$ 이 된다. 그림 3에서 $b_k = (X_k, Y_k)$ 이고 이들은 시간 k 인 순간에 터보 부호기에서 발생된 시스템 매트릭 시퀀스와 패리티 시퀀스에 각각 대응하여 수신된다. 터보 코드에서 대부분의 시간 지연은 인터리버에서 발생되며, 모든 시간 지연이 100 ms 이내이면 실시간 음성 통신이 가능하다. 9.6 kbps의 데이터율에서 인터리버 길이가 400 비트이면 약 83.3 ms의 시간 지연이 발생된다[8]. 이러한 시간 지연은 송·수신기의 처리 지연까지 고려할 때 음성 통신까지도 가능하다. 터보 코드에 대하여 심볼당 에너지를 다음과 같이 비트당 에너지로 바꿀 수 있다.

$$E_s = E_b R_c \frac{n-v}{n} \quad (7)$$

여기서, R_c 는 부호율이고, $(n-v)/n$ 는 부호기를 종료시키기 위해서 v 개의 테일 비트를 사용한 것을 고려하기 위해 곱해지는 상수이다. 모두 0인 시퀀스가 보내어져서 그 중 잘못된 부호어를 복호할 때 적어도 2 비트의 정보에 에러가 발생하게 된다. 그러므로 터보 코드의 에러 확률에 관한 하한(lower bound)은 다음과 같이 주어진다[9].

$$P_b \geq \frac{2}{n-v} P_c \quad (8)$$

5. 수치 계산 및 검토

그림 4는 레일리 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 사용자 수에 관계없이 음성 서비스의 QoS (Quality of Service) 조건인 $BER = 10^{-3}$ 을 만족시키지 못함을 알 수 있다. 결론적으로 레일리 페이딩 채널에서 음성 서비스를 지원하기 위해서는 강력한 성능 개선 기법이 요구됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 강력한 성능 개선 기법으로 최근에 급부상하고 있는 터보 코드를 적용하여 성능 개선 정도를 평가하고자 한다.

그림 5는 레일리 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 Turbo Coded MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 터보 코드를 적용함에 의해 BER 성능이 매우 개선되며, 사용자 수에 관계없이 음성 서비스 ($BER = 10^{-3}$)를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있다.

예를 들어 E_b/N_0 가 10 dB이고 사용자 수가 10 명인 경우, 터보 코드를 적용함에 의해 BER 성능이 약 5×10^{-3} 정도 개선됨을 알 수 있다.

그림 6은 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 에 따른 MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 E_b/N_0 값을 아무리 높일 지라도 음성 서비스 ($BER = 10^{-3}$)를 지원하지 못함을 알 수 있다.

그림 7은 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 에 따른 Turbo Coded MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림으로부터 터보 코드를 적용함에 의해 낮은 E_b/N_0 값으로도 충분히 음성 서비스를 지원할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 다중 경로 레일리 페이딩 채널에서 MC CDMA 시스템의 BER 성능을 분석하였고, 최근에 가장 강력한 부호화 기법으로 급부상하고 있는 터보 코드를 MC CDMA 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하였다.

성능 해석 결과, 레일리 페이딩 채널에서는 강력한 성능 개선 기법을 적용하지 않는 한 사용자 수와 E_b/N_0 값에 관계없이 음성 서비스를 지원하지 못함을 알 수 있었다. 한편, 터보 코드를 성능 개선 기법으로 적용하면 BER 성능이 매우 개선되고, 사용자 수와 E_b/N_0 값에 관계없이 음성 서비스를 충분히 지원할 수 있음을 알 수 있었다. 예를 들어 E_b/N_0 가 10 dB이고 사용자 수가 10 명인 경우, 터보 코드를 적용함에 의해 BER 성능이 약 5×10^{-3} 정도 개선됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. L. Pickholtz, D. L. Schilling and L. B. Milstein, "Theory of spread spectrum communications-A tutorial," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-30, no. 5, pp. 855-884, May, 1982.
- [2] K. S. Kim, I. Song, S. I. Park and B. H. Chung, "Analysis and performance comparison of the trellis coded and convolutional coded DS/SSMA systems in impulsive noise environment," *Proc. Inst. Elect. Eng., Commun.*, vol. 145, no. 4, pp. 283-287, Aug., 1998.
- [3] S. Kondo, and L. B. Milstein, "Performance of multicarrier DS-CDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 238-246, Feb., 1996.
- [4] R. Prasad, *Universal Wireless Personal Communications*, Artech House Publishers, 1998.
- [5] T. F. Ho, "Performance evaluation for multi-carrier CDMA system," *VTC 96*, pp. 1101-1105, 1996.
- [6] K. Fazel and G. P. Fettweis, *Multi-Carrier Spread Spectrum*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [7] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajashima, "Near Shannon limit error-correction coding and decoding : turbo coding," in *International Conference on Communications*, pp. 1064-1070, 1993.
- [8] V. Kuhn, "Evaluation the performance of turbo codes and turbo-coded modulation in a DS-CDMA environment," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 12, pp. 2138-2147, Dec. 1999.
- [9] W. J. Blackert, E. K. Hall, and S. G. Wilson, "An upper bound on turbo code free distance," *IEEE ICC*, vol. 2, June 1996.

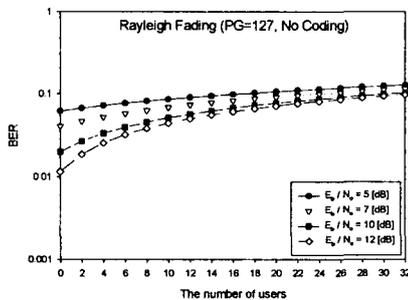


그림 4. 레일리 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능

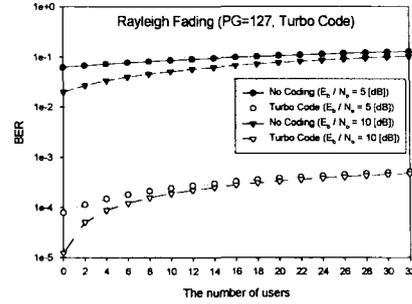


그림 5. 레일리 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 turbo coded MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능

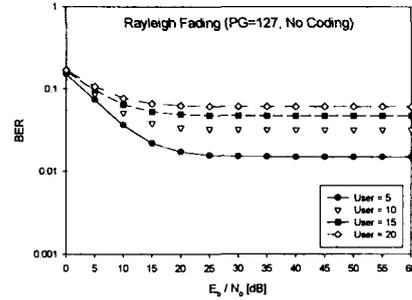


그림 6. 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 에 따른 MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능

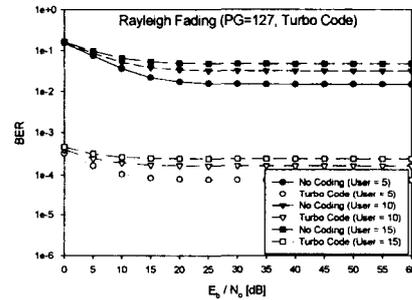


그림 7. 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 에 따른 turbo coded MC CDMA/QPSK 시스템의 BER 성능