

무선환경 하에서 적응형 변조기를 적용한 다중 반송파 CDMA 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of Multicarrier CDMA System
with Adaptive Modulation in Wireless Environment

이광희, 김항래, 한태영, 김남
충북대학교 정보통신공학과

Lee Kwang-Hee, Kim Hang-Rae, Han Tae-Young,
Kim Nam

Dept. of Computer & Communication Eng.,
Chungbuk National Univ.

요약

본 논문은 무선 환경하에서, 적응형 변조기와 적응형 부채널 할당 방식을 적용한 다중 반송파 CDMA 시스템의 성능을 분석한다. 제안한 시스템의 경우, 총 부채널수가 4이고 이 가운데 두 개의 부채널로 데이터를 전송한다면 각 채널의 임계값은 5.2 dB, 9 dB, 13.2 dB와 8.4 dB, 12.2 dB, 16.3 dB 나타났다. BER이 10⁻³을 만족하는 평균 E_b/N_0 는 8.1 dB로 기존의 시스템에 비해 12.9 dB의 성능이 개선되었다. 평균 심볼당 비트수는 7 bit의 경우 약 15 dB의 평균 E_b/N_0 가 필요하다.

Abstract

In this paper, the performance of a multicarrier CDMA system applying adaptive modulation and adaptive subchannel allocation scheme is analyzed in wireless environment. In case of the proposed system, total subchannels is 4 and data is transmitted over 2 subchannels with the biggest fading, Threshold of each channels is 5.2 dB, 9 dB, 13.2 dB and 8.4 dB, 12.2 dB, 16.3 dB. The BER of 10⁻³ is 8.1 dB. This is increased 12.9 dB in comparison with the existing system. The BPS according to average channel is needed average E_b/N_0 of about 15 dB in 7 bit.

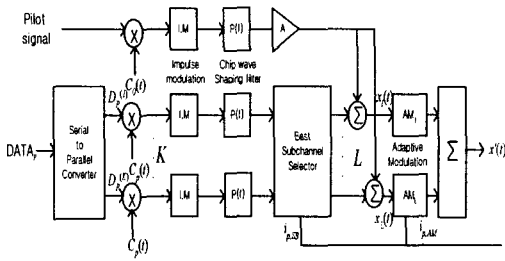
I. 서론

최근 정보화사회가 가속화됨에 따라 무선 채널을 통한 고속 및 양질의 음성, 데이터, 영상을 동시에 수용할 수 있는 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 급속히 확대되고 있다. 이러한 요구에 따라 고속의 패킷 데이터 전송이 필요시 되고 있으나 기존의 QPSK 변조 방식을 사용한 데이터 전송으로는 그 한계가 있다.

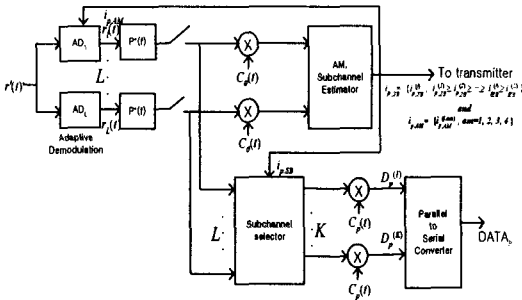
본 논문은 적응형 변조 방식을 적용한 적응형 다중 반송파 CDMA 시스템(Adaptive Modulation Adaptive Multicarrier CDMA)의 성능을 분석한다. 적응형 변조 방식은 그레이 코드를 신호점으로 적용한 QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM을 사용하고, 적응형 다중 반송파 시스템은 L개의 부채널 중 페이딩 진폭이 큰 K

개의 선택된 부채널로 각 사용자의 DS 파형을 전송하는 방식을 사용한다[2]. 변조 방식 및 부채널 결정은 파일럿 신호를 사용하여 모든 부채널의 진폭 및 채널 에러를 계산한 인덱스 정보에 의해 결정한다.

본 논문의 구성은 II장에서 순방향 링크에서 시스템의 모델을 설명하고, III장에서는 적응형 변조기의 비트 에러율(BER; Bit Error Rate) 및 심볼당 평균 비트수(BPS; Bits Per Symbol)의 수식을 유도한다. 성능 분석은 IV장에서 보인다.



(a) 송신기



(b) 수신기

▶▶ 그림 1. 시스템 모델 (a)송신기 (b)수신기

II. 시스템 모델링

순방향 링크에 대하여 제안한 시스템 모델링은 그림 1에 나타내었다. 적응형 변조기를 적용한 적응형 다중 반송파 CDMA 시스템의 모델링은 [3]에서 제안한 다중 반송파 CDMA 시스템을 바탕으로 한다. 제안한 시스템은 L개의 부채널 중 사용자는 우선 채널 상태가 가장 좋은 채널 K개를 선택하고, 협대역 DS 파형은 선택된 부채널을 통하여 전송한다. 이 때 시스템의 총 대역폭 $WT=L \cdot W_s$ 이며 선택된 채널의 총 대역폭 $WK=K \cdot W_s$ 이다. 여기서 $L \geq K$ 이다[4].

송신기는 p번째 사용자 데이터 수열을 K개의 데이터 수열로 병렬 처리한 $D_p^{(k)}(t)$ 는 N개의 칩으로 구성되어 있는 확산 코드 $C_p(t)$ 에 의해 확산이 이루어진다. 수열 $D_p^{(k)}(t)C_p(t)$ 는 임펄스 변조단과 칩 파형 정형 필터를 통과한다. 이때, E_c 는 칩 에너지이다. 부채널 선택기에서는 각 채널 상태 정보를 지닌 부반송파 인덱스 $i_{p,SB} \equiv \{i_{p,SB}^{(1)}, i_{p,SB}^{(2)}, \dots, i_{p,SB}^{(K)}, \dots, i_{p,SB}^{(L)}\}$ 를 이용하여

L개의 부채널 중 p번째 사용자에게 가장 적합한 K개의 부채널을 할당한다. 데이터 신호와는 달리 파일럿 신호는 수신단에서 부채널 상태를 판별할 수 있도록 모든 L개의 부반송파 채널로 전송한다. 파일럿 심볼은 1의 수열로 구성되며, 파일럿 확산 코드는 $C_0(t)$ 이다. 데이터 신호와 파일럿 신호는 적응형 변조기단을 통과하기 이전에 결합한다. 결합한 신호는 적응형 변조기로 입력되고, I 채널과 Q 채널로 각각 분배된다. 각 채널의 적응형 변조기는 수신단의 판별기로부터 채널 상태를 판별한 적응형 변조기 인덱스 정보에 의하여 정해진 데이터 신호량 만큼을 진폭 변환한다, 이후 I 채널에는 $\cos(\omega_c t)$, Q 채널에는 $\sin(\omega_c t)$ 의 부반송파에 실어 전송한다.

수신 신호는 반송파 제거 및 송신 신호 복원을 위하여 적응형 복조기를 통과하고, 이 때 복조가 동기 복조로 이루어진다. 적응형 복조기내의 AMP/DS 변환기(amplitude to data sequence converter)는 진폭 신호를 데이터 신호로 변환한다. $D_p^{(k)}(t)C_p(t)$ 와 $C_0(t)$ 는 수신 신호를 반송파 제거 후 AMP/DS 변환기에 의하여 진폭을 데이터 수열로 변환한 $D_p(t)C_p(t)$ 와 $C_0(t)$ 이다. 이후 데이터 신호는 칩 파형 정형 필터를 거친다. 최적의 부채널 및 적응형 변조기 판별기에서는 각각의 부반송파 채널에 대해 페이딩 진폭이 가장 큰 수신값을 이용 $i_{p,SB}$ 하여 채널 상태를 추정한다. 이때 결정된 인덱스를 $i_{p,AM}$ 라고 하면 적응형 복조단에서 $i_{p,AM}$ 를 이용하여 변조 방식을 결정하고, 부채널 선택기에선 $i_{p,SB}$ 를 이용하여 페이딩 진폭이 큰 K개의 부채널을 선택한다. 이렇게 선택된 부채널은 송신 데이터를 추정하기 위하여 필터 출력과 사용자 수열을 곱한다. P/S 변환기(parallel to serial converter)는 각 채널로 수신된 송신 데이터를 조합하며 원 데이터를 복원한다.

본 논문은 무선 환경구간을 레일레이 페이딩으로 가정한다. 임의의 p번째 사용자에 대한 l번째 부반송파 전송 채널 임펄스 응답(impulse response)의 복소 저역 통과 등가적인 표현(complex lowpass equivalent representation) $h_{p,l}(t)$ 는 다음과 같다.

$$h_{p,l}(t) = \alpha_{p,l} e^{j\phi_{p,l}} \delta(t) \quad \text{for } l=1, 2, \dots, K \dots L \quad (1)$$

여기서 $\alpha_{p,l}$ 은 p번째 사용자에게 l번째 부반송과 전송 채널 이득으로 iid(independent and identically distributed) 랜덤 변수(random variable)이고, $e^{j\phi_{p,l}}$ 는 p번째 사용자의 l번째 부반송과 전송 채널 위상으로 $[0, 2\pi)$ 에서 균일한 랜덤 변수이다.

III. 성능 분석

송신단으로부터 전송되는 l번째 부반송과 채널은 무선 구간에서 M개의 전송 경로를 거쳐 $\{(a_{p,l,1}^2(E_s/N_0) \geq a_{p,l,2}^2(E_s/N_0) \geq \dots \geq a_{p,l,M}^2(E_s/N_0))\}$ 으로 전송된다고 가정한다. 수신단의 판별기는 각각의 부반송과 채널에 대해 페이딩 진폭이 가장 큰 수신값을 이용하여 채널 상태를 추정한다.

1. M진 QAM을 사용한 임계값

최적의 시스템을 구성하기 위해서는 모든 부채널에 대해 채널 상태가 좋은 K개의 부채널을 선택함과 동시에 각 채널 상태에 따른 차등 임계값이 필요하다. 이는 적응형 변조기에 사용되는 변조방식의 성능이 채널 환경에 따라 다르기 때문이다. 따라서 제안한 시스템이 최적의 성능을 얻기 위해서는 각 채널 상태에 따른 적응형 변조기의 차등 임계값을 구해야한다. 여기서 임계값은 비트 에러율이 1%를 만족하는 평균 E_b/N_0 로 나타낸다. E_b/N_0 는 수신 신호값 $\alpha^2(E_s/N_0) = \alpha^2(E_b \log_2 M/N_0)$ 로부터 구할 수 있다. E_s 는 심볼 에너지이며 $\log_2 M$ 은 심볼당 비트수이다.

j번째 채널에서 M진 QAM 변조 방식의 비트 에러율(BER)은 다음과 같이 쓸 수 있다[5].

$$P_M(r_j) = \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3r_j \log_2 M}{M-1}}\right) \quad (2)$$

위 수식에서

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy \quad (3)$$

이고, $r_j = \{\alpha_{p,j,1}^2 E_b/N_0\}$ 는 순시 E_b/N_0 (Instantaneous E_b/N_0)이다.

r_j 의 확률 밀도 함수는 다음과 같다[4].

$$f(r_j) = \frac{L!}{(L-j)!(j-1)!} \sum_{s=0}^{L-j} \binom{L-j}{s} \cdot (-1)^s \frac{1}{r_j} e^{-(s+j)r_j/\bar{r}_j} \quad (4)$$

위 식에서 $\bar{r}_j = E\{\alpha_{p,1}^2 E_b/N_0\}$ 으로 평균 E_b/N_0 (Average E_b/N_0)이다. 신호가 무선 구간에서 레일리 페이딩 채널을 통과하였을 경우 j번째 채널에 의해 수신되는 신호의 비트 에러율 $P_{M(j)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{M(j)} = \int_0^\infty P_M(r_j) f(r_j) dr_j \quad (5)$$

임계값은 식 (5)에 의하여 구해지며, 평균 비트 에러율 $P_{M(j)}$ 가 1%를 만족하는 평균 E_b/N_0 이다.

2. 제안한 시스템의 심볼당 평균 비트수

제안한 시스템의 경우 적응형 변조기에 사용되는 변조 방식은 QPSK, 16 QAM, 64 QAM 및 256 QAM이다. j번째 채널에 의해 수신되는 신호의 심볼당 비트수(BPS)는 r_j 의 확률 밀도 함수에 의해 결정되고, 다음과 같이 쓸 수 있다[6].

$$B_{AM(j)} = 2 \int_0^{l_1} f(r_j) dr_j + 4 \int_{l_1}^{l_2} f(r_j) dr_j + 6 \int_{l_2}^{l_3} f(r_j) dr_j + 8 \int_{l_3}^\infty f(r_j) dr_j \quad (6)$$

위 식에서 l_1, l_2, l_3 는 변조기의 임계값으로 식 (5)로부터 구해지며, $f(r_j)$ 는 (4)이다.

그러므로, 수신단의 판별기에 의해 최적의 채널 상태

갖는 부채널 ($j=1, 2, \dots, K$)들을 선택하였을 경우, 시스템의 심볼당 평균 비트수는 다음과 같다.

$$B_{BPS} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K B_{AM(j)} \quad (7)$$

3. 제안한 시스템의 비트 에러율

적응형 변조기를 적용한 적응형 부반송파 시스템에서 j 번째 채널의 비트 에러율 $P_{AM(j)}$ 는 다음과 같이 표현된다[6].

$$\begin{aligned} P_{AM(j)} = & B_{AM(j)}^{-1} \left[2 \int_0^{l_1} P_4(r_j) f(r_j) dr_j \right. \\ & + 4 \int_{l_1}^{l_2} P_{16}(r_j) f(r_j) dr_j \\ & + 6 \int_{l_2}^{l_3} P_{64}(r_j) f(r_j) dr_j \\ & \left. + 8 \int_{l_3}^{\infty} P_{256}(r_j) f(r_j) dr_j \right] \quad (8) \end{aligned}$$

여기서 $B_{AM(j)}$ 는 심볼당 비트수로 식 (6)과 같으며, l_1, l_2, l_3 는 변조기의 임계값으로 식 (5)로부터 구한 평균 E_b/N_0 이다. $P_M(r_j)$ 는 비트 에러율 수식으로 식 (2)이고, $f(r_j)$ 는 r_j 의 확률 밀도 함수 식 (4)이다.

수신단의 판별기에 의해 최적의 부채널 ($j=1, 2, \dots, K$)을 선택하였을 경우 시스템의 평균 비트 에러율은 식 (9)와 같이 나타내어진다.

$$P_{error} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K P_{AM(j)} \quad (9)$$

IV. 성능 분석

그림 2는 제안한 시스템의 임계값을 나타낸다. 여기서 부반송파 수 L 은 4이다. 가장 좋은 부채널로 전송될 경우, 적응형 변조기의 임계값은 5.2 dB, 9 dB, 13.2 dB로 나타났으며, 두 번째로 좋은 부채널로 전송할 경우에 따른 변조기 임계값은 8.4 dB, 12.2 dB, 16.3 dB로 각각 나타났다. 가장 열악한 부채널에 대해서는 19.4 dB, 22.7 dB, 26.5 dB로 나타났으며, 높은 평균 E_b/N_0 가

요구되었다. 따라서 채널 환경이 열악할수록 높은 평균 E_b/N_0 가 요구된다.

그림 3은 평균 E_b/N_0 에 따른 BER로 비교 분석한 결과로서, 식 (9)와 식 (10)에 의해 구하여진다. 여기서 적응형 변조기를 적용한 시스템의 임계값은 그림 2에서 구한 값을 적용하였으며, 제안한 시스템은 총 4개의 부채널 중 채널 상태가 좋은 두 개의 부채널을 선택하였다. 채널 평균 BER이 10⁻³을 만족할 경우 제안한 시스템은 평균 E_b/N_0 가 8.1 dB로 나타났다. 각 채널에 대해서는 채널 상태가 가장 좋은 부채널로 전송될 경우에 BER이 10⁻³을 만족하는 평균 E_b/N_0 는 5.2 dB인 반면 두 번째로 좋은 부채널로 전송될 경우에는 8.1 dB 이상의 평균 E_b/N_0 가 필요하였다. 따라서 두 채널 사이에 2.9 dB의 성능 차이가 있음을 알 수 있다.

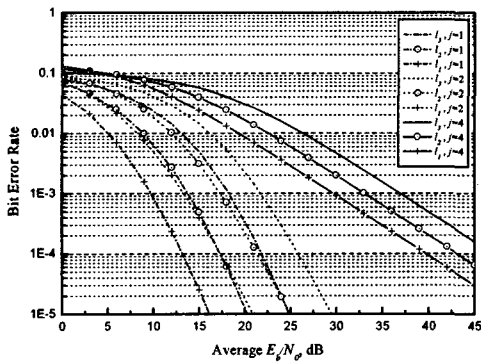
그림 4는 평균 E_b/N_0 에 따른 BPS로 비교 분석한 결과로서, 식 (7)과 식 (8)에 의해 구하여진다. 기존의 시스템이 채널당 평균 심볼당 비트수는 2 bit로 고정되어 있는 반면 제안한 시스템은 최대 256 QAM 방식을 사용하였기에 평균 E_b/N_0 의 변화에 따라 심볼당 평균 비트수가 최대 8 bit까지 전송이 가능함을 알 수 있다. 그러나 이런 채널 상태에 따라 그 성능의 차이가 있다. 제안한 시스템의 경우 심볼당 평균 비트수가 7 bit 이상 이려면 15 dB의 평균 E_b/N_0 가 요구되어진다. 채널 상태가 가장 좋은 두 채널에 대해 심볼당 평균 비트수가 7 bit 이상 이려면 11 dB와 17 dB로 나타나 6 dB의 성능 차이를 보였다.

■ 참고문헌 ■

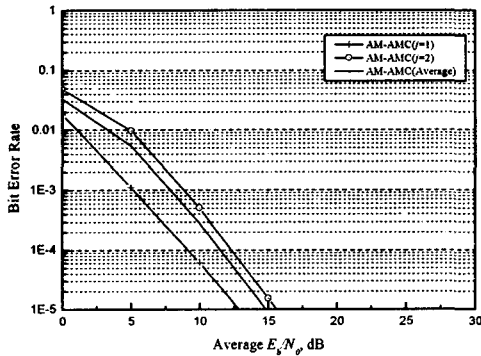
- [1] 최호규, "IMT-2000 고속 패킷데이터 전송 시스템", TTA저널 제82호, pp.80-90, 2002년 7-8월.
- [2] Y. H. Kim and I. Song, "A multicarrier CDMA system with adaptive subchannel allocation for forward links," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 1428-1436, Sep. 1999.
- [3] L. Litwin, "An introduction to multicarrier modulation," IEEE Potentials, pp.36-38. April-May 2000.
- [4] Q. Chen, E.S. Sousa, and S. Pasupathy, "Multicarrier CDMA with with adaptive frequency hopping for

mobile radio systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 14, no. 9, pp.1852-1858, Dec. 1996.

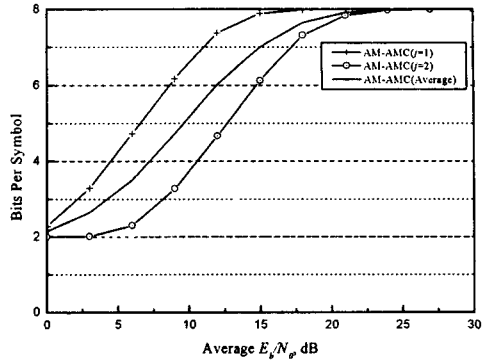
- [5] D. Yoon, K. Cho, and J. Lee, "Bit error probability of M-ary quadrature amplitude modulation," IEEE VTS-Fall VTC 2000. 52nd, vol. 5, pp.2422 -2427, 2000.
- [6] J. M. Torrance and L. Hanzo, "Upper bound performance of adaptive modulation in a slow Rayleigh fading channel," Electronics Letters, IEEE, vol. 32, no. 8, April, 1996.



▶▶ 그림 2. 적응형 변조기를 적용한 다중 반송파 시스템의 임계값 비교



▶▶ 그림 3. 시스템의 평균 E_b/N_0 대 BER 비교 (L=4, K=2)



▶▶ 그림 4. 시스템의 평균 E_b/N_0 대 BPS 비교 (L=4, K=2)