

다중사용자 환경에서 CI-OFDM 시스템의 성능분석에 관한 연구

A Study on Performance Analysis of CI-OFDM system for multi-user environment

김철성

(한국해양대학교 대학원)

최종호

조형래

(한국해양대학교 전파공학과 부교수)

Key Words : OFDM, CI-OFDM, CIMA

목 차

I. 서론

II.. CI-OFDM 시스템

III. CI-OFDM 시스템 성능 분석

IV. 결론

I. 서론

오늘날 세계는 무선이동통신의 급격한 발전과 다양한 멀티미디어 콘텐츠의 개발로 인해 광대역의 무선 스펙트럼에 대한 요구가 크게 증가하고 있다. 이렇게 무선이동통신의 상황이 급변하면서 최대의 문제는 스펙트럼 수요가 공급을 훨씬 초과하고 있으며, 현재 거의 모든 주파수를 사용하고 있는 실정므로, 제한된 대역폭을 효율적으로 사용하면서 고속/고성능 데이터 전송방법을 찾기 위해 많은 연구가 진행 중이다.

단일 반송파를 사용하는 방식으로 시분할 다중접속(TDMA ; Time Division Multiple Access), 주파수 분할 다중 접속(FDMA ; Frequency Division Multiple Access), 그리고 부호 분할 다중 접속(CDMA ; Code Division Multiple Access) 방식 등이 있다. 단일 반송파로는 시스템의 성능면에서나 용량면에서 한계를 나타내며, 차세대 통신의 요구를 충족시킬 수 없다. 그래서 다중 반송파를 사용하여 다중 접속하는 형태로 발전하게 되었다. 예를 들면 다중반송파-부호분할 다중접속(MC-CDMA ; Multi Carrier - Code Division Multiple Access) 방식이나 직교 주파수 분할 다중(OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 있다.[1],[2].

MC-CDMA 방식의 경우 IMT-2000 (IMT-2000 ; International Mobile Telecommunication - 2000)의 동기식 방식의 역방향 채널에 대한 표준이며, OFDM의 경우 고속무선랜의 표준(IEEE 802.11a)일 뿐만 아니라 유럽의 디지털 방송의 표준이기도 하다[3].

MC-CDMA 방식은 기존의 직접확산-부호분할다중접속(DS-SS-CDMA ; Direct Sequence-Code Division Multiple Access)에서 사용하였던 확산코드를 적용하지만, 단일 반송파에 의한 직접적인 확산이 아니라 협대역의 다중반송파를 확산코드를 이용하여 스펙트럼에 배치하는 방식이다[4].

MC-CDMA 방식은 DS-SS-CDMA 방식처럼 확산코드의 특성에 따라 시스템의 전송신호가 직교성을 갖거나 의사 직교성을 가지게 된다. OFDM방식의 경우는 직교하는 다중 반송파들을 중첩시켜 스펙트럼의 효율을 높였고, 병렬전송의 형태를 취함

으로써 속도를 높이는 효과를 나타낸다[5].

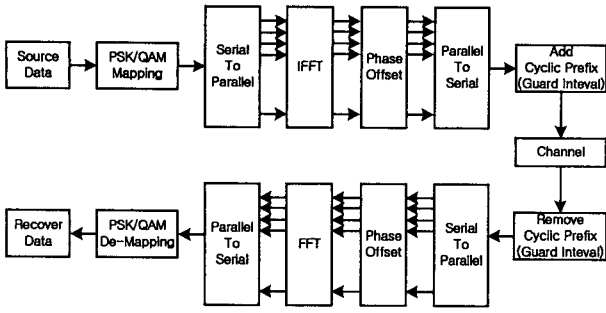
최근 새로운 다중 반송파 다중 접속 방식으로 Carl R. Nassar 교수에 의해 CIMA 방식이 소개되었다[6]. CIMA방식의 경우 다중 반송파들을 중첩시킨 형태이다. 개념적으로는 MC-CDMA나 OFDM방식과 유사하지만, CIMA를 구성하는 반송파 신호의 특성은 자신의 파형과 시간 이동한 파형의 상관관계가 직교함으로써 반송파간의 중첩 형태에 대해 시간적으로 직교하는 장점이 있다. 직교하는 지점이 반송파의 개수에 약 2배정도이기 때문에 시스템의 스펙트럼 효율이나 용량면에서 매우 효율적으로 활용할 수 있다. 반송파 간섭신호를 이용하는 CIMA는 사용자수에 따라 직교성과 의사 직교성을 유동적으로 가짐으로서 시스템 구성과 성능 그리고 용량면에서 많은 장점을 가진다[7].

본 논문에서는 차세대 멀티미디어 통신의 요구에 따라 다중 반송파를 이용한 다중액세스 방식에 대한 연구하고자 한다. 기존의 다중 반송파를 이용한 다중 액세스 방식과 CIMA 및 기존의 OFDM 방식을 보다 효율적으로 활용할 수 있는 방안으로 CI 신호를 적용한 CI-OFDM 방식에 대하여 시뮬레이션을 통한 성능분석을 하고자 한다.

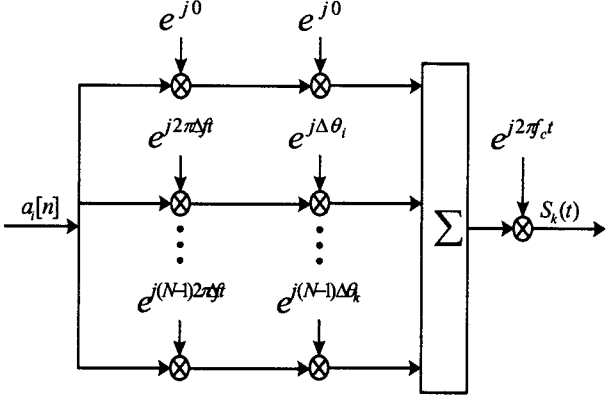
II. CI-OFDM(CIMA) 시스템

반송파 간섭 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM ; Carrier Interferometry - Othogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 주파수 상에서 Δf 로 주파수를 동일하게 나눈 N개의 부반송파들의 중첩신호로 구성된다. 그리고 각 부반송파에 대해 위상 오프셋을 부여하여 구성하며, CI 신호는 직교성을 가지기 때문에 다중 접속 방식으로 신호를 전송하더라도 사용자들을 분리해낼 수 있다.

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 구성은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM)이나 다중 반송파 부호 분할 다중 접속(MC-CDMA) 시스템과 비슷하며 전체 블록도는 그림 1과 같다.



<그림 1> CI-OFDM 시스템의 구성도



<그림 2> k번째 사용자에 대한 CI-OFDM 송신기

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템에서 k 번째 사용자에 대한 송신기는 그림 2와 같다. 여기서 k 번째 사용자의 확산 부호는 $(1, e^{j\Delta\theta_k}, e^{j2\Delta\theta_k}, \dots, e^{j(N-1)\Delta\theta_k})$ 이다. 입력 데이터 심벌은 $a_k[n]$ 이고, 여기서 n 은 n 번째 비트를 나타내고 k 는 k 번째 사용자를 의미한다. 다시 말해서 k 번째 사용자의 n 번째 데이터 심벌을 나타내는 것으로서, 전송신호를 수식적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$s_k(t) = a_k[n] \sum_{i=0}^{N-1} \cos(2\pi(f_c + i\Delta f)t + i\Delta\theta_k) p(t) \quad (1)$$

여기서 $p(t)$ 는 구간 $[0, T_b]$ 에서 크기 1 을 나타내는 펄스이다. f_c 는 반송파의 주파수이고, i 는 부반송파를 의미하며 식에서는 N 개의 부반송파를 가지게 된다. 그리고 $\Delta\theta_k$ 는 k 번째 사용자의 위상 오프셋이다.

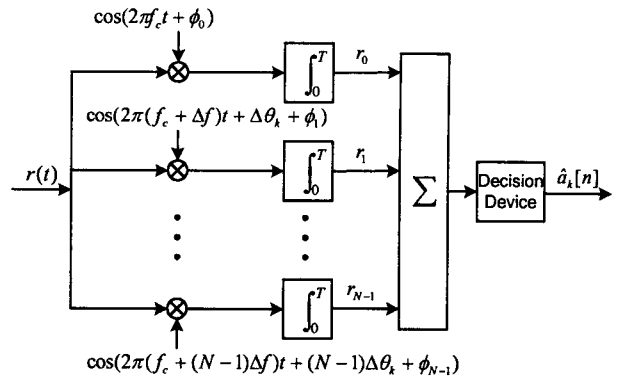
식 (1)을 간략화 하면 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$s_k = a_k[n] c_k(t) p(t) \quad (2)$$

여기서 $c_k(t)$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 반송파에 적용된 위상 오프셋 $i\Delta\theta_k$ 를 가지는 CI 신호이다. 한편 수신신호는 식 (3)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{N-1} a_k[n] a_i \cos(2\pi(f_c + i\Delta f)t + i\Delta\theta_k + \phi_i) + n(t) \quad (3)$$

여기서, a_i 는 채널에 대한 이득이고 ϕ_i 는 i 번째 반송파의 위상 오프셋이다. 그리고 K 는 시스템을 사용하는 전체사용자의 수이며, $n(t)$ 는 AWGN 을 나타낸다. k 번째 사용자에 대한 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 수신기는 그림 3과 같다.



<그림 3> k번째 사용자에 대한 CI-OFDM 수신기

여기서 수신신호는 전송신호에 대해 직교 정규화 된 반송파를 $r = (r_0, r_1, \dots, r_{N-1})$ 로 검출하게 된다. 여기서 r_i 는 식 (4)과 같다.

$$r_i = a_i a_k[n] + \sum_{j=1, j \neq k}^K a_j[n] a_i \cos(i(\Delta\theta_j + \Delta\theta_k)) + n(t) \quad (4)$$

여기서 n_i 는 평균이 0 이고 분산이 $\frac{N_i}{2}$ 인 가우시안 랜덤 변수이고 위상과 주파수 동기가 정확하게 일치하는 것으로 가정한다.

출력 $\hat{a}_k[n]$ 을 위한 적절한 결합방식은 결정변수에 의해 결정된다. 다양한 결합 방식들이 사용되어 진다. 등가 이득 결합법(EGC ; Equal Gain Combining) 의 경우 결정변수가 식 (5)와 같이 모든 경로의 출력을 합하여 생성된다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i \quad (5)$$

부가 백색 가우시안 잡음(AWGN ; Additive White Gaussian Noise) 채널에서는 사용자들 간에 직교성이 정확히 유지되므로 이 방식이 간단하면서 적합한 결합방식이다. 그러나 전체 대역폭에서 주파수 선택적 페이딩이 발생하면 각 반송파들은 평탄 잡음이 추가되며, 등가 이득 결합법(EGC)의 결정변수는 다중 사용자간의 간섭성분으로 인해 특성이 열화되므로 실제로는 적절하지 않다.

직교 비율 결합법(ORC ; Orthogonal Ratio Combining)은 다중 사용자간 간섭을 제거하기 위해 경로 변수를 결합하는 방식으로 페이딩이 발생하더라도 사용자간에 직교성을 복원한다. 그러나 잡음은 일반적으로 결합하는 과정에서 확장된다. 이 결합방식의 결정변수를 식 (6)과 같이 선형 결합하여 나타

낸다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i / a_i \quad (6)$$

최소 자승 오류 결합법(MMSEC ; Minimum Mean Square Error Combining)을 사용할 경우 결정변수는 식 (7)과 같다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i \cdot \frac{a_i}{R_i a_i^2 + N_0/2} \quad (7)$$

여기서 R_i 는 사용자 수 K 와 반송파의 수 i 에 대한 알고 있는 상수 값이다. 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식의 신호 전력은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식과 유사하다. 동일한 반송파를 이용하므로 평균 전력은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 의 평균전력과 동일하다.

그러나 최대전력의 경우에는 각각의 사용자를 구분하기 위해서 사용되는 위상 오프셋을 적용함에 따라 사용자 j 의 신호 전력이 최대값을 가지면 다른 사용자 i 의 신호전력은 최소의 값을 갖는다. 따라서 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 신호의 최대전력은 식 (8)과 같다.

$$P_{CI-OFDM_{max}} = \frac{1}{2} \max_{0 < k < T} |s(t)|^2 \quad (8)$$

III. CIMA 시스템 성능 분석

1. 컴퓨터 모의 실험

본 논문에서 제안하고 있는 차세대 무선 멀티미디어 통신을 위한 CI-OFDM 시스템을 구성하고 시스템의 성능을 컴퓨터 모의실험을 수행하였고, 그 결과를 분석하였다.

컴퓨터 모의실험은 크게 두 가지 형태로 이루어졌다. 첫 번째는 새로운 다중 액세스 방식으로 제안된 CI-OFDM 시스템이 기존의 다중 액세스 방식들에 비해 어떠한 우수성을 가지는가를 평가하였다. 우선 채널환경을 동일하게 하였고, 비교 대상이 된 기존의 다중액세스 방식으로는 DS-CDMA 와 MC-CDMA 를 정하였다. 다중 액세스 방식의 기준이 되는 용량을 비교하기 위해 의사 직교성을 갖는 골드 코드와 직교성을 가지는 왈쉬 코드를 적용하였다.

그리고 성능 비교의 공정성을 기하기 위해 DS-CDMA 와 MC-CDMA 에서 사용된 확산코드의 길이와 CI-OFDM 에 사용된 CI 신호의 반송파 수는 동일하게 하였다. 또한 시스템의 오율 특성을 비교하기 위해 E_b/N_0 의 변화에 대한 시스템의 BER 특성을 비교하였다. 채널환경으로는 AWGN 과 Rayleigh 페이딩 환경을 모두 고려하였으며, 신호에 대한 매핑 방식은 QPSK 를 적용하였다.

다중경로 환경으로는 직접파 외에 지연반사파를 고려하였으며 정규화 된 최대 도플러 주파수 $f_D T_s$ 는 0.1 로 하였다. 시

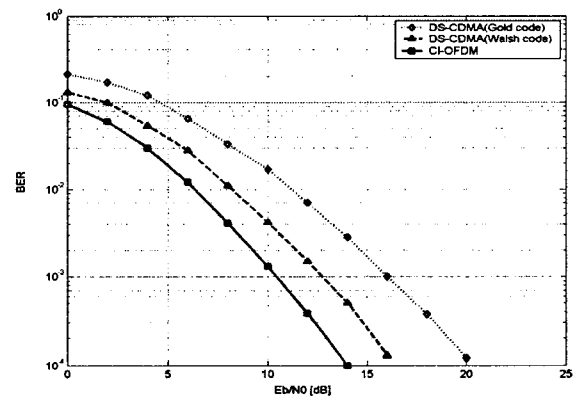
물레이션의 간략화를 위해 송수신간의 동기가 일치하는 것으로 하였다. 수신기의 합성방식은 모두 MMSEC 방식으로 하였다.

다음으로 고속 무선랜의 표준(IEEE 802.11a)인 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식과 성능을 비교하였다. 표준에 따라 부채널의 수를 64로 하였고, 샘플링의 주기는 50 [ns] 이고 보호구간은 0.8 [ns] 로 하였다. 매핑방식은 직교 위상 변조(QPSK) 방식으로 하였으며, 총 심볼주기는 4 [ns] 로 하였다.

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식은 직렬별 변환기에 의한 부채널의 수를 64 개로 동일하게 하였으며, CI 신호를 적용하기 위한 반송파 간섭신호의 수는 16 개로 설정하여 직교성이 유지되도록 위상 오프셋을 부여하였다. 시물레이션을 통해 E_b/N_0 에 대한 비트오율(BER ; Bit per Error Ratio) 특성을 부가적 백색잡음(AWGN ; Additive White Gaussian Noise) 채널과 레일리 페이딩 채널에서 비교하였으며, 특히 두 시스템간의 최대전력 대 평균전력 비(PAPR ; Peak-to-Average Power Ratio)를 비교하여 전력효율 측면을 비교하였다.

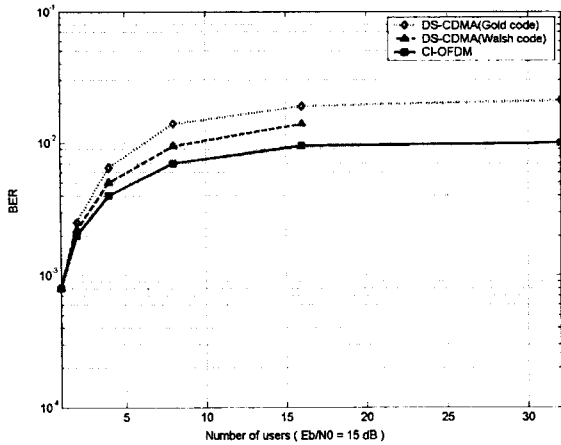
2. DS-CDMA와 CI-OFDM의 성능 비교

그림 4는 사용자의 수를 32 명으로 고정하고 E_b/N_0 에 따른 비트오율(BER) 을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 성능이 골드 부호와 왈쉬 부호를 적용한 직접 순차 부호 분할 다중접속(DS-CDMA) 시스템의 성능보다 우수함을 알 수 있다.



<그림 4> E_b/N_0 에 대한 BER

그림 5는 E_b/N_0 을 15 [dB] 로 고정하고 사용자의 수가 증가함에 따라 각 시스템의 비트오율(BER) 을 비교한 것이다. 이때 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템과 직접 순차 부호 분할 다중접속(DS-CDMA) 시스템은 각각 사용자 수에 적합한 반송파와 확산 코드를 갖도록 하는 조건을 부여 하였다.

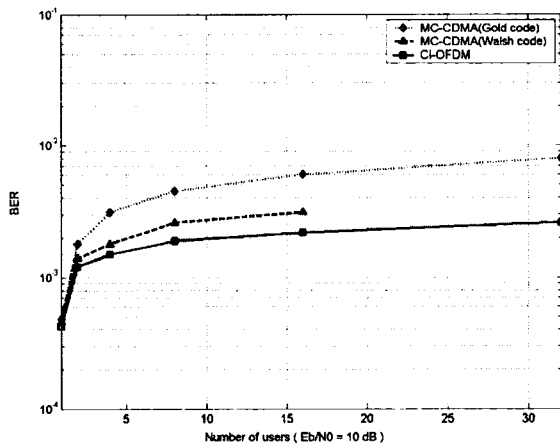


<그림 5> 사용자 수에 대한 BER ($E_b/N_0=15[dB]$)

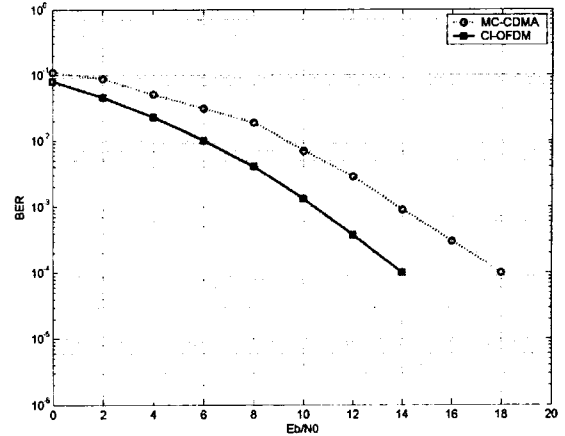
3. MC-CDMA와 CI-OFDM의 성능비교

그림 6은 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 을 10 [dB] 로 고정하고 사용자의 수가 증가함에 따라 각 시스템의 비트오율 (BER)을 비교한 것이다. 다중 반송파 부호 분할 다중 접속 (MC-CDMA) 시스템이 의사 직교성을 갖는 골드 코드를 사용하였을 경우 코드 길이의 약 2 배 정도의 사용자를 수용할 수 있으나 시스템의 성능이 좋지 못하다.

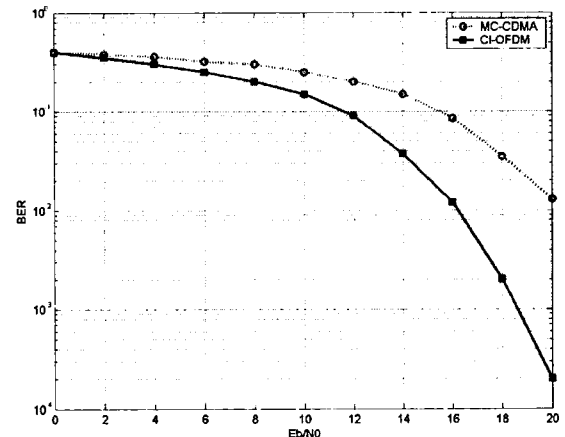
그림 7은 부가적 백색잡음(AWGN) 채널환경에서 비트오율 (BER) 특성을 비교한 것이다. 비트오율(BER) 이 10^{-4} 일 때 약 4 [dB] 정도의 성능차를 보여주고 있다. 그림 8은 레일리 페이딩 채널환경에서의 비트오율(BER) 특성이다. 두 결과에서 알 수 있듯이 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중 (CI-OFDM) 방식의 성능이 우수함을 알 수 있다.



<그림 6> 사용자 수에 따른 BER ($E_b/N_0=10[dB]$)



<그림 7> AWGN 채널에서 BER 성능

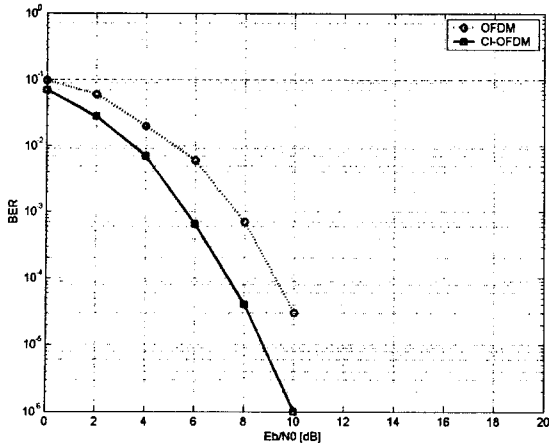


<그림 8> Rayleigh fading 채널에서 BER 성능

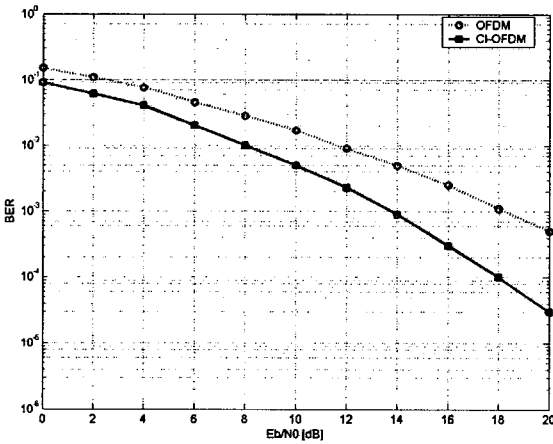
4. OFDM과 CI-OFDM의 성능 비교

그림 9는 부가적 백색잡음(AWGN) 채널에서, 그림 10은 레일리 페이딩 채널에서 기존의 직교 주파수 분할 다중화 (OFDM) 방식과 반송파 간섭성 주파수 분할 다중화 (CI-OFDM) 방식을 신호전력 대 잡음전력의 비(E_b/N_0)에 따른 비트오율(BER) 특성으로 비교한 결과이다. 결과 그래프에서 알 수 있듯이 반송파 간섭성 주파수 분할 다중화 (CI-OFDM) 방식이 부가적 백색잡음 채널에서 약 2 [dB], 레일리 페이딩 채널에서 약 4 [dB] 이상의 이득을 나타내고 있음을 알 수 있다.

직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템은 직교성이 유지되기 어려운 채널환경에서 시스템의 성능이 크게 열화되며, 또한 각 비트들에 발생하는 플랫 페이딩은 정보손실을 초래하게 된다. 이를 개선하기 위해 채널 코딩 기법을 적용하게 되지만 전체 데이터율이 감소된다. 그러나 반송파 간섭신호를 적용하게 되면 대역폭의 확장이나 데이터율의 감소 없이 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

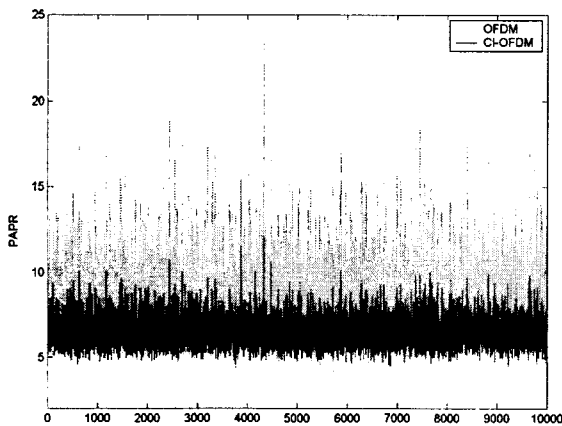


<그림 9> AWGN 채널에서 시스템 성능



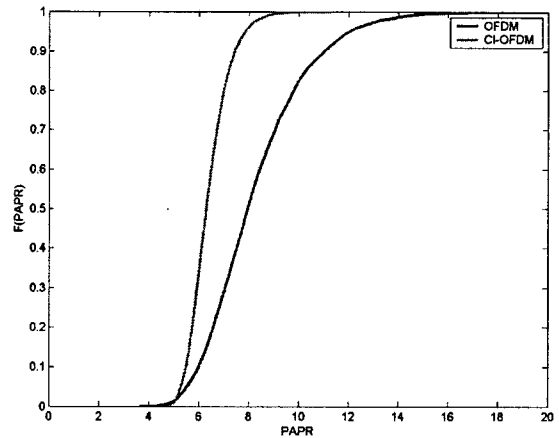
<그림 10> Rayleigh 페이딩 채널에서 시스템 성능

그림 11은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템과 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 최대전력 대 평균전력의 비(PAPR)를 비교한 그림이다. 가로축은 전송데이터를 나타낸 것이고 세로축은 최대전력 대 평균전력의 비(PAPR)을 나타내고 있다. 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 경우 최대값은 23.55, 평균값은 8.27 이다. 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 경우 최대값은 12, 평균값은 6.38로 CI신호를 적용함으로써 부반송파들이 동위상으로 겹쳐지는 현상이 줄어 시스템의 성능이 개선됨을 알 수 있다.



<그림 11> OFDM과 CI-OFDM의 PAPR

그림 12는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템과 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 최대전력 대 평균전력 비(PAPR)에 대한 누적분포를 나타낸 것이다. 그림에서 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템은 전송의 약 90 [%] 이상이 8 이하였다. 반면 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템은 약 50 [%] 정도만이 8 이하였다. 따라서 CI신호를 적용한 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템이 최대전력 대 평균전력 비(PAPR)를 개선함으로써 시스템의 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.



<그림 12> OFDM과 CI-OFDM의 PAPR에 대한 CDF

IV. 결론 및 향후 과제

최근 무선 이동통신환경에서 고속의 대용량 정보전송에 대한 수요가 급증하고 있다. 이에 제한된 주파수 스펙트럼을 효율적으로 이용하기 위한 새로운 다중 액세스 방식이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 C. R. Nassar 등에 의해 제안된 새로운 다중 접속 방식으로 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식에 대하여 연구하였다. 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식은 직교하는 다중 부반송파에 위상 오프셋을 부여하여 신호를 구성한다. CI 신호는 자신의 신호와 시간 이동한 신호 사이의 상호 상관관계가 0 이 되는 특성을 가지며, 부반송파의 개수보다 2 배에 가까운 직교 지점을 가진다.

따라서 기존의 다중 반송파를 사용하는 방식들에 비해 용량 면에서 효율적인 결과를 보였다. 또한 각 데이터에 대해 각각의 위상오프셋을 부여함으로써 직교성을 가지는 다중 반송파가 전송도중에 직교성이 흐트러지더라도 위상오프셋을 통해 신호에 대한 복원이 가능하다. 따라서 열악한 통신채널환경에서도 우수한 오류 특성을 가진다.

다중 액세스 방식인 직접 순차 부호 분할 다중 접속(DS-CDMA) 방식이나 다중 반송파 부호 분할 다중 접속(MC-CDMA) 방식은 의사 직교성이나 직교성을 가지는 확산 부호를 사용하여 다중 접속한다.

컴퓨터 모의실험 결과에 의하면, 의사직교성을 가지는 코드 코드로 통신을 하였을 경우 부호 길이의 약 2배 정도의 사용자를 수용할 수 있으나 사용자간의 상관성으로 인해 성능이 좋지 않은 결과를 보였다. 직교성을 가지는 왈쉬 코드로 시스템을 구성하였을 경우 사용자간에 상관성이 0이므로 상호간섭이 없기 때문에 비트오율(BER) 성능은 좋으나 사용자의 수가 부호의 길이로 제한된다. 더 많은 사용자를 수용하기 위해서는 부호의 길이가 길어져야 하는데 코드의 길이는 대역폭과 밀접한 관계가 있다. 반면에 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템의 경우 고정된 확산부호를 사용하는 것이 아니라 CI 신호 자체가 직교성과 위상오프셋을 가지는 형태이며 반송파들이 중첩되어 스펙트럼에 위치하므로 스펙트럼 효율도 개선되는 장점을 가지는 것을 알 수 있었다.

다수의 직교하는 반송파를 이용하는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템은 다중경로 페이딩에 강한 특성뿐 아니라 스펙트럼의 효율이 높고 데이터를 병렬로 처리함으로써 고속의 정보 전송이 가능하다는 점에서 많은 분야의 적용을 위해 연구가 진행되고 있다.

그러나 전송 채널 상에서의 전파 지연이 커질 경우 심벌 간 간섭과 채널 간 간섭에 의해 반송파간의 직교성이 상실되면 시스템의 성능이 크게 저하되는 문제점이 있다. 또한 신호가 독립적으로 변조된 다수의 반송파들의 중첩으로 구성되므로, 동위상으로 더해지면 최대전력 대 평균전력 비(PAPR)가 커지는데, 이는 시스템의 성능열화와 직접적인 관계가 있다. 하지만 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템에서는 각각의 데이터를 전체의 반송파로 변조하고 위상 오프셋을 부여함으로써 동위상으로 겹쳐져 발생하는 최대전력 대 평균전력 비(PAPR)를 크게 줄이는 효과를 확인할 수 있었다.

누적분포를 나타낸 결과에서 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템에서는 전송신호의 90 [%] 이상이 8 이하의 값을 나타내었으며, 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 경우에는 전송신호의 50 [%] 정도만 8 이하의 값을 가짐을 보임으로써 시스템의 성능이 개선됨을 알 수 있었다.

이러한 결과를 통해 새로운 다중 액세스 방식인 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식은 기존의 다중 접속 방식들보다 효율적임을 확인할 수 있었으며, 이러한 새로운 방식은 차세대 고속 멀티미디어 시스템을 구성함에 적합할 것이다.

끝으로 현실의 열악한 무선통신환경을 적용하기 위해서 심벌간 간섭과 채널간 간섭과 높은 PAPR을 저감하기 위해 반송파 간섭성을 이용한 CI-OFDM 방식을 제안하였으며, 모의실험을 통해 그 우수성을 확인할 수 있었다. 하지만 더욱더 안정적이고 신뢰성있는 통신시스템을 구축하기 위해서는 더욱 다양한 변조방식, 채널환경, 동기화, 오류정정 기법을 적용하여 시스템 성능을 분석해야 할 것이다.

참고문헌

1. S. Hara and R. Prasad, "Overview of multi-carrier CDMA," IEEE Communications Magazine, vol.35, no.12, pp.126-133, Dec. 1997.
2. Richard Van Nee, Ramjee Prasad, OFDM for wireless multimedia communications, Artech House Inc., pp.20-24, 2000.
3. 3GPP2 IS-2002.2 Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum System, pp.2-1, 2-207, 2004.
4. N. Yee and J. P. M. G. Linartz, "Controlled equalization for multi-carrier CDMA," Proc. of IEEE VTC '94, pp.1665-1669, Stockholm, Sweden, June 1994.
5. Rorie O'Neill, Luis B. Lopes, "A study of novel OFDM transmission schemes for use in indoor environments," IEEE Trans. Comm., vol.E76-B, no.2, pp.909-913, May 1996.
6. C. R. Nassar, B. Natarajan, S. Shattil, "Introduction of carrier interference to spread spectrum multiple access," Wireless Communications and Systems, 1999 Emerging Technologies symposium, pp. 4.1-4.5, April 1999.
7. Wu Zhiqiang, C. R. Nassar, "MMSE frequency combining for CI/DS-CDMA," Radio and wireless conference 2000, IEEE, pp.103-106, Sept 2000.
8. Sergio Verdu, Multiuser Detection, Cambridge university press, pp.2-10, 1998.
9. 김충남, 차세대 이동통신 실무기술, 진한도서, 2001.
10. 옥윤철, all that's CDMA, 진한도서, pp.129-131, pp.67-73, 2002.
11. Khaled Fazel, Setfan Kaiser, Multi-Carrier Spread-Spectrum & Related Topics, Kluwer Academic Publishers, pp.3-12, 2004.
12. 강희조, 무선정보통신기초, 대영사, pp.257-268, 2001.
13. 조용수, 무선멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초, 대영사, pp.153-155, 2000.
14. Hiroshi Harada, Ramjee Prasad, Simulation and software radio for mobile communications, Artech House Publishers, pp.165-203, 2002.