

공학석사 학위논문

다중사용자 환경에서 위상 오프셋이 적용된
CI 신호를 사용한 OFDM 시스템의 성능분석

Performance Analysis of OFDM system using the CI signal
applied phase offset for multi-user environment

지도교수 조 형 래

2005 년 8 월

한국해양대학교 해사산업대학원

전기전자제어공학과

최 중 호

본 논문을 최종호의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 기 문 (인)

위원 김 기 만 (인)

위원 조 형 래 (인)

2005 년 8 월

한국해양대학교 해사산업대학원

전기전자제어공학과

목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
제 2 장 다중접속 시스템의 개요	3
2.1 개 요	3
2.2 시분할다중접속(TDMA) 방식	5
2.3 주파수분할다중접속(FDMA) 방식	6
2.4 부호분할다중접속(CDMA) 방식	7
2.5 다중반송과 부호분할다중접속(MC-CDMA) 방식	9
2.6 직교 주파수분할다중접속(OFDM) 방식	10
제 3 장 CI-OFDM(CIMA) 시스템	14
3.1 CI 신호의 구성 및 특성	14
3.2 OFDM 시스템	18
3.3 CI-OFDM 시스템	21
제 4 장 컴퓨터 모의실험 및 성능분석	26
4.1 컴퓨터 모의실험	26
4.2 DS-CDMA와 CIMA의 성능 비교	27
4.3 MC-CDMA와 CIMA의 성능 비교	29
4.4 OFDM과 CI-OFDM의 성능 비교	31
제 5 장 결 론	34
참고문헌	36

Nonmenclature

$s(t)$: transmission signal
Δf	: Deviation of frequency
β_n^i	: Spread code
T_s	: Symbol period
$p(t)$: Pulse signal
d_i	: Input data stream
N	: Number of subcarriers
$r(t)$: Receive signal
$c(t)$: CI signal
$E(t)$: Envelope of CI signal
$A(l)$: Amplitude of sub-lobe
$\Delta\theta$: Phase offset
$R_{i,j}(\tau)$: Mutual relationship of the user i and j 's envelope
τ	: Time offset
f_c	: Frequency of carrier
ϕ_i	: Phase offset of i -th subcarrier
$\eta(t)$: AWGN
\widehat{a}_k	: Output data
D	: Decision variable
P_0	: Power of subcarrier
A_0	: Amplitude of subcarrier
E_b / N_0	: Ratio of signal vs noise energy
$f_D T_s$: Nomalized doppler frequency

Abbreviations

AWGN	: Additive White Gaussian Noise ; 부가 백색 가우시안 잡음
BER	: Bit Error Rate ; 비트 오류
CDF	: Cumulative Distribution Function ; 누적 분포 함수
CDMA	: Code Division Multiple Access ; 부호 분할 다중 접속
CI	: Carrier Interferometry ; 반송파 간섭
CIMA	: Carrier Interferometry Multiple Access ; 반송파 간섭 다중 접속
CI-OFDM	: Carrier Interferometry-OFDM ; 반송파 간섭 직교 주파수 다중화
DFT	: Discrete Fourier Transform ; 이산 푸리에 변환
DS-SS	: Direct Sequence-Spread Spectrum ; 직접 순차 대역 확산
DS-CDMA	: Direct Sequence-CDMA ; 직접 순차 부호 분할 다중 접속
EGC	: Equal Gain Combining ; 등가 이득 결합법
FDM	: Frequency Division Multiplexing ; 주파수 분할 다중화
FDMA	: Frequency Division Multiple Access ; 주파수 분할 다중 접속
FFT	: Fast Fourier Transform ; 고속 푸리에 변환
FH-SS	: Frequency Hopping-Spread Spectrum ; 주파수 도약 - 대역 확산
FM	: Frequency Modulation ; 주파수 변조
GI	: Guard Interval ; 보호 구간
HPA	: High Power Amplifier ; 고출력 증폭기
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers ; 전기 전자 기술자 협회
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transform ; 역 고속 푸리에 변환
IMT-2000	: International Mobile Telecommunication 2000
ISI	: Inter-Symbol Interference ; 심볼 간 간섭
LAN	: Local Area Network ; 근거리 정보 통신망
MC-CDMA	: Multi Carrier-CDMA ; 다중 반송파 부호 분할 다중 접속
MMSEC	: Minimum Mean Square Error Combining ; 최소 자승 오류 결합법
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing ; 직교 주파수 분할 다중화
ORC	: Orthogonal Ratio Combining ; 직교 결합법
PAPR	: Peak-to-Average Power Ratio ; 최대-평균 전력비
PCM	: Pulse Code Modulation ; 펄스 코드 변조
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation ; 직교 진폭 변조
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying ; 직교 위상 편이 변조
TDM	: Time Division Multiplexing ; 시 분할 다중화

그림 목 차

그림 2.1	TDMA 방식의 기본 개념도	5
그림 2.2	TDM 방식의 기본 개념도	6
그림 2.3	FDMA 방식의 기본 개념도	6
그림 2.4	FDM 방식의 기본 개념도	7
그림 2.5	CDMA 방식의 기본 개념도	8
그림 2.6	대역 확산 방식의 기본 개념도	8
그림 2.7	MC-CDMA 송신기의 기본적인 신호처리	10
그림 2.8	OFDM 방식의 기본개념	11
그림 2.9	OFDM 부반송파의 스펙트럼	12
그림 2.10	OFDM 수신기의 복조 원리	12
그림 2.11	OFDM 시스템의 구성도	13
그림 3.1	CI 신호 (N=16)	15
그림 3.2	CI 신호의 포락선	16
그림 3.3	위상 오프셋이 적용된 CI 신호의 포락선	17
그림 3.4	CI 신호의 직교성(사용자 3명)	18
그림 3.5	각 부반송파들의 스펙트럼	19
그림 3.6	CI-OFDM 시스템의 구성도	21
그림 3.7	k 번째 사용자에게 대한 CI-OFDM 송신기	22
그림 3.8	k 번째 사용자에게 대한 CI-OFDM 수신기	23
그림 4.1	E_b/N_0 에 대한 BER	27
그림 4.2	사용자 수에 대한 BER($E_b/N_0 = 15[\text{dB}]$)	28
그림 4.3	사용자 수에 대한 BER($E_b/N_0 = 10[\text{dB}]$)	29
그림 4.4	AWGN 채널에서 BER 성능	30
그림 4.5	Rayleigh fading 채널에서 BER 성능	30
그림 4.6	AWGN 채널에서 BER 성능	31
그림 4.7	Rayleigh fading 채널에서 BER 성능	32
그림 4.8	OFDM 과 CI-OFDM 방식의 PAPR	33
그림 4.9	OFDM 과 CI-OFDM 방식의 PAPR 에 대한 CDF	33

**Performance Analysis of OFDM system using the CI signal applied
phase offset for the environment of multi-user**

Jong-ho, Choi

*Department of Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime University*

Abstract

Nowadays, the need for the wireless spectrum has increased due to the rapid growth in wireless mobile communication. Though established communication type was limited to transmitting voice and simple messages, recent communication type even supports animated images and wireless internet service. Therefore, in order to provide rapid and high-capacity information to a great number of users simultaneously in the limited wireless spectrum, we need to develop an effective way of sharing this limited spectrum efficiently. For this reason, much research has been being conducted on ways of both using the limited bandwidth efficiently and transmitting data in high-speed and with high efficiency.

The form of multiple access using single-carrier evolved into the form of multiple access using multi-carrier. In the form of multiple access using multi-carrier, the typical method is MC-CDMA and OFDM. MC-CDMA is the standard of the synchronous mode of IMT-2000, and OFDM is the standard of high-speed wireless LAN(IEEE 802.11.a), and is also the standard of digital broadcasting in Europe. Although MC-CDMA uses orthogonal spread codes as the traditional DS-CDMA, it incorporates narrowband multi-carrier to spectrum by using the spread code, instead of direct spread of single-carrier. MC-CDMA system have orthogonality or pseudo orthogonality by the spread code's characteristic. OFDM improve the utility of spectrum by using orthogonal multi-carrier repeatedly and the transmission speed by parallel transmitting the data.

Recently, there is a new method of transmission, which is CIMA proposed by professor Carl R. Nassar. CIMA uses the orthogonality of CI signal and provides phase offset to each carrier. CIMA excels any other traditional methods using multi-carrier in performance by reiterating the orthogonal multi-carrier, thus increasing the efficiency of the frequency spectrum.

In this thesis, research multiple access method which use multi-carrier with the purpose of meeting the needs of oncoming generation of multimedia communication. And the performance analysis of the traditional multiple access method which using the multi-carrier and CI-OFDM that applied CI signal for using the traditional OFDM more efficiently.

다중사용자 환경에서 위상 오프셋이 적용된 CI 신호를 사용한 직교 주파수 분할 다중 시스템의 성능분석

최 종 호

한국해양 대학교 해사산업대학원
전기·전자·제어 공학과

오늘날 세계는 무선이동통신의 급격한 발전과 다양한 멀티미디어 콘텐츠의 개발로 인해 무선 스펙트럼에 대한 요구가 크게 증가하고 있다. 기존의 음성과 단순한 문자 정보를 교환하던 무선이동통신과는 달리 최근에는 음성 및 문자뿐만 아니라 동영상의 전송 및 무선인터넷 기능의 서비스까지 제공하고 있다. 이렇게 무선이동통신의 상황이 급변하면서 최대의 문제는 스펙트럼 수요가 공급을 훨씬 초과하고 있다. 현재 주파수 상황은 거의 모든 주파수를 사용하고 있는 실정이므로 제한된 대역폭을 효율적으로 사용하면서 고속의 고성능 데이터 전송방법을 찾기 위해 많은 연구가 진행 중이다.

예를 들어, 단일 반송파를 사용하는 다중액세스 방식으로 TDMA, FDMA, 그리고 CDMA 방식들이 있다. 이들은 하나의 무선채널을 여러 명이 동시에 사용할 수 있도록 특정 규칙으로 채널을 분배하여 다중액세스 하는 형태이다. 단일 반송파로는 시스템의 성능면에서나 용량면에서 한계를 나타내며 차세대 통신의 요구를 충족시킬 수 없다. 이러한 단일 반송파를 사용하여 다중액세스를 하던 방식에서 다중 반송파를 사용하여 다중 액세스하는 형태로 발전하게 되었다. 다중 반송파를 사용하는 다중 접속 방식으로는 MC-CDMA 방식이나 OFDM 방식이 대표적이다. MC-CDMA 방식의 경우 IMT-2000의 동기식 방식의 역방향 채널에 대한 표준이며, OFDM의 경우 고속 무선 LAN의 표준(IEEE 802.11a)일 뿐만 아니라 유럽의 디지털 방송의 표준이기도 하다.

MC-CDMA 방식은 협대역의 다중반송파를 확산부호를 이용하여 스펙트럼에 배치하는 방식이며, DS-SS 방식처럼 확산부호의 특성에 따라 전송신호가 직교성을 갖거나 의사 직교성을 갖게 된다. OFDM 방식은 직교하는 다중 반송파들을 중첩시켜 스펙트럼의 효율을 높였고, 병렬전송의 형태를 취함으로써 속도를 높이는 효과를 나타낸다.

최근 또 하나의 새로운 다중 반송파 다중 액세스 방식으로 C. R. Nassar 교수에 의해 CIMA 방식이 소개되었다. CIMA 방식의 경우 다중 반송파들을 중첩시킨 형태이다. 개념적으로는 MC-CDMA나 OFDM 방식과 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 가짐으로써 시스템 구성과 성능 그리고 용량면에서 많은 장점을 가진다.

본 논문에서는 차세대 멀티미디어 통신의 요구에 따라 다중 반송파를 이용한 다중액세스 방식에 대한 연구하고자 한다. 기존의 다중 반송파를 이용한 다중 액세스 방식과 기존의 OFDM 방식을 보다 효율적으로 활용할 수 있는 방안으로 CI 신호를 적용한 CI-OFDM 방식을 시뮬레이션을 통하여 성능을 분석하고자 한다.

제 1 장 서 론

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 실정이므로, 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-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-CDMA 방식처럼 확산코드의 특성에 따라 시스템의 전송신호가 직교성을 갖거나 의사 직교성을 가지게 된다. OFDM방식의 경우는 직교하는 다중 반송파들을 중첩시켜 스펙트럼의 효율을 높였고, 병렬전송의 형태를 취함으로써 속도를 높이는 효과를 나타낸다[5].

최근 새로운 다중 반송파 다중 접속 방식으로 Carl R. Nassar 교수에 의해 CIMA 방식이 소개되었다[6]. CIMA 방식의 경우 다중 반송파들을 중첩시킨 형태이다. 개념적으로는 MC-CDMA나 OFDM 방식과 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.

본 논문의 전체 6장으로 구성되어 있으며, 제 1 장 서론에서는 연구의 배경 및 목적을 살펴보고, 제 2 장에서는 다중 액세스 시스템의 개요, 제 3 장에서는 CI-OFDM 시스템의 개요를 설명하고, 제 4 장에서는 시뮬레이션 및 성능분석 결과를 도시한다. 그리고 제 5 장은 결론으로서 본 논문의 결과에 대하여 논하고 향후 연구 과제를 제시하였다.

제 2 장 다중접속 시스템의 개요

2.1 개요

다중 접속 방식은 제한된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위해 여러 사용자가 동일한 채널을 분할하여 사용하는 방식으로 신호를 직교성이나 의사 직교성이 유지된 다중화신호에서 원하는 신호를 분리해낼 수 있도록 하는 것이다[8].

직교성을 유지한다는 것은 다중화 된 사용자간에 간섭을 주지 않는다는 의미이므로 동일 채널 상에서도 사용자간의 신호는 구분 가능하다. 하나의 채널을 분할하여 사용하고자 하는 사용자 i 와 j 가 있을 때 이들 각각의 전송신호 $s_i(t)$ 와 $s_j(t)$ 는 시간영역에서 식 (2.1)과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_i(t) s_j(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

그리고 주파수 영역에서는 식 (2.2)와 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_i(f) S_j(f) df = 0 \quad (2.2)$$

사용자간에 반드시 직교성을 만족해야만 채널을 다중화하여 사용할 수 있는 것은 아니다. 즉, 사용자 i 와 j 의 전송신호가 의사직교 상태를 만족하더라도 동일 채널을 분할하여 사용할 수 있다. 물론 전송신호 $s_i(t)$ 와 $s_j(t)$ 간에 약간의 간섭은 발생할 수 있으나 신호의 분리에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이런 경우에 신호는 식 (2.3)과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_i(t) s_j(t) dt < \epsilon \quad (2.3)$$

여기서 ϵ 은 0에 가까운 매우 작은 값이다. 이를 주파수 영역에서 표현하면 사용자들의 신호들은 식 (2.4)를 만족한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_i(f) S_j(f) df < \epsilon \quad (2.4)$$

사용자들의 신호들이 직교성 및 의사 직교성을 만족할 때 이들 간에는 장단점이 있다. 직교성을 유지하는 경우 사용자 i 에 대한 수신기에서 사용자 j 의 신호가 간섭을 주지 않으며, 수신기에서의 오율이 낮아져 시스템의 성능은 우수해진다. 그러나 이 방식은 채널을 분할하여 사용할 수 있는 사용자의 수가 제한된다. 반면 의사 직교성을 유지하도록 신호를 전송한다면, 여러 사용자 신호들간에 수신기에서 다른 신호에 간섭을 주는 현상이 발생하므로 약간의 성능 감쇄가 야기되지만, 더 많은 사용자들에게 동일한 채널을 분할할 수 있으므로 시스템의 용량면에서 효율적이다.

다중 액세스 방식으로는 단일 반송파를 사용하는 방식으로 시간과 주파수 채널의 직교성을 이용하는 TDMA와 FDMA 방식과 사용자들에게 확산부호를 부여하여 다중 접속하는 CDMA 방식이 있다. CDMA의 일반적인 형태는 DS-CDMA로 단일 반송파를 사용하는 다른 다중액세스 방식에 비해 매우 효율적이다.

다중 반송파를 사용하는 방식 중 MC-CDMA는 CDMA의 한 형태로 각 사용자의 데이터 심벌을 N 개의 협대역 부반송파로 동시에 변조하여 전송하는 방식이며, OFDM은 직렬 데이터를 병렬 데이터로 전환한 뒤 직교하는 다중 부반송파로 변환하여 데이터를 고속으로 처리하는 방식이다.

OFDM은 직교하는 부반송파를 중첩시켜 사용하므로 주파수 스펙트럼의 효율이 높다. 이에 고속 무선 LAN이나 유럽의 디지털 방송에서 표준으로 채택하고 있다. CI-OFDM(CIMA)는 주파수 상에서 Δf 로 주파수를 동일하게 나눈 N 개의 부반송파들의 중첩신호로 구성된다. 이는 기존의 MC-CDMA나 OFDM 방식과 매우 유사하다. 그러나 각 부반송파에 대해 위상 오프셋을 부여하여 구성하며, 각 신호는 직교성을 가지므로 다중 액세스 방식으로 신호를 전송하더라도 사용자들을 분리해낼 수 있다.

2.2 TDMA 방식

시분할다중접속(TDMA ; Time Division Multiple Access) 방식은 정해진 주파수 대역을 주기적으로 일정한 시간간격으로 나누어 각 사용자가 차례대로 자기에게 할당된 시간동안 신호를 전송하는 방식이다. 수신측에서는 해당시간에만 수신정보를 수신하는 방식으로, 이러한 시간 간격을 타임 슬롯(Time Slot)이라 하며 자기정보를 수신하기 위하여 타임게이트(Time Gate)를 사용한다.

그림 2.1은 시분할다중접속(TDMA) 방식의 기본 개념도이며, 이 방식은 펄스 부호 다중화(PCM ; Pulse Code Multiplexing) 방식을 이용한 펄스 통신방식으로 여러 다른 채널로부터의 정보를 추출하고 채널사이의 시간에 시차를 두어 하나의 전송시스템으로 동시에 전송하는 방식이다.

그림 2.2는 시 분할 다중화(TDM ; Time Division Multiplexing) 방식의 원리를 보인다. 시분할 다중화(TDM) 방식은 여러 채널 즉 부채널을 차례로 스캔(Scan)하여 어떤 부채널이 실제 전송한 데이터가 없는 경우에도 시간 폭은 마찬가지로 배정되며, 특정신호는 시간슬롯의 선택에 의해 복원될 수 있다.

디지털 방식은 요구되는 신호 대 잡음비(SNR ; Signal to Noise Ratio)가 약 6~7 [dB] 이고, 이로 인하여 주파수 재사용 계수를 3~4 정도까지 줄일 수 있어 가입자 수용용량이 약 2배 정도 증가한다[9].

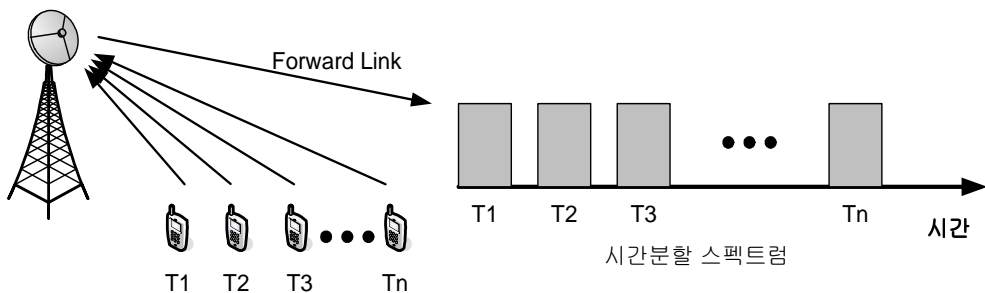


그림 2.1 TDMA 방식의 기본 개념도

Fig. 2.1 Concept of TDMA.

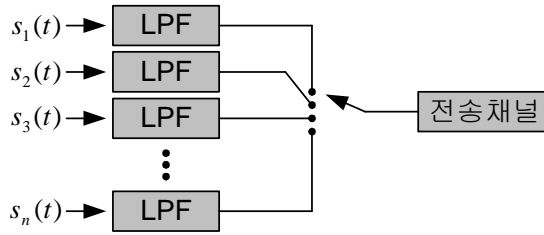


그림 2.2 TDM방식의 기본 개념도

Fig. 2.2 Concept of TDM.

2.3 FDMA 방식

주파수 분할 다중접속(FDMA ; Frequency Division Multiple Access) 방식은 주파수 분할 다중화(FDM ; Frequency Division Multiplexing) 방법을 이동통신망의 기지국과 단말기 사이에 적용한 방식으로, 사업자에 할당된 주파수를 통신에 필요한 최소한의 주파수대역으로 나누어 이를 각 가입자에게 할당하는 방식이다.

기지국에서는 순방향 링크로 각 단말기에 주파수를 할당하여 통화를 한다. 즉, 각 채널에 대한 반송파가 다르게 선택되어 변조된다. 각각의 변조

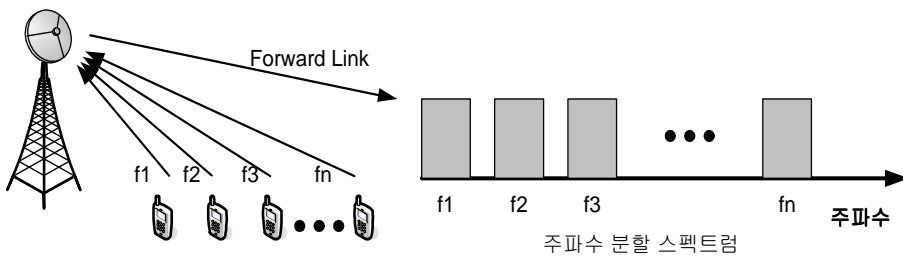


그림 2.3 FDMA 방식의 기본 개념도

Fig. 2.3 Concept of FDMA.

신호들의 합으로 이루어진 합성신호는 넓은 대역을 갖는 하나의 아날로그 신호가 되어 전송된다. 단말기에서는 역방향 링크로 기지국에 Paging 신호를 보내서 채널을 할당 받아 통화를 한다.

그림 2.3은 주파수 분할 다중 접속(FDMA) 방식의 기본 개념도를 보여주고 있다. 그림 2.4는 주파수분할 다중화(FDM) 방식의 원리를 보여주는 것으로 음성 또는 데이터의 연속적인 신호를 전송하는 경우 한 개의 전송로에 다수 사용자의 신호를 동시에 전송 가능하도록 다중화하는 과정으로, 수용하고자 하는 사용자들에게 각각 상이한 주파수를 할당하여 한 개의 광대역 전송로를 통하여 전송하는 방식이다.

주파수 분할 다중 접속(FDMA) 방식의 경우 채널 간 상호간섭 방지를 위해 보호대역(Guard Band)를 둔다. 주파수 변조(FM)에서 음성품질을 높이기 위해서 변조 대역폭을 넓게 하면, 통화 채널이 줄어들기 때문에 음성품질과 통화채널 수를 적절히 조정하여 대역폭을 결정하여야 한다[9].

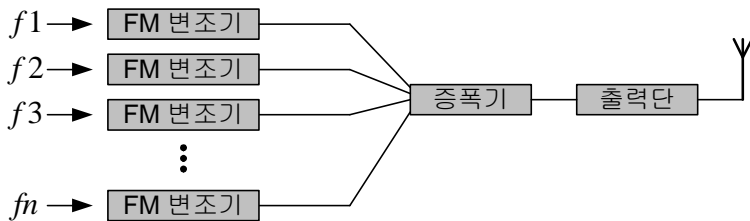


그림 2.4 FDM 방식의 기본 개념도

Fig. 2.4 Concept of FDM.

2.4 CDMA 방식

부호 분할 다중 접속(CDMA ; Code Division Multiple Access) 방식은 스펙트럼 확산방식을 이용한 것으로 동일한 주파수 대역내에서 각 가입자 채널을 상호간에 서로 상관도가 낮은 부호를 부여하여 신호를 변조하고, 수신측에서는 송신측에서 사용한 부호와 동일한 부호를 사용하여 신호의 복원이 가능하도록 하는 방식이다.

그림 2.5는 부호 분할 다중 접속(CDMA) 방식의 기본 개념도이다. 이 방식에서 전송하려는 정보신호의 대역폭보다 훨씬 넓은 전송대역폭을 가지는 확산 부호를 사용하는 스펙트럼 확산(Spread Spectrum) 방식을 사용한다. 즉, 넓은 주파수 대역을 사용하므로 단위 주파수당 전파 강도는 매우 작으면서도 백색잡음 (White Noise)에 가까운 신호를 전송하며, 송·수신단에서는 정교한 신호에너지 집합과정을 통하여 원래의 신호를 재생하는 방식이다. 그림 2.6은 스펙트럼 확산의 기본원리로서 신호의 대역을 확산하여 의사잡음과 같이 전송하는 방식이다.

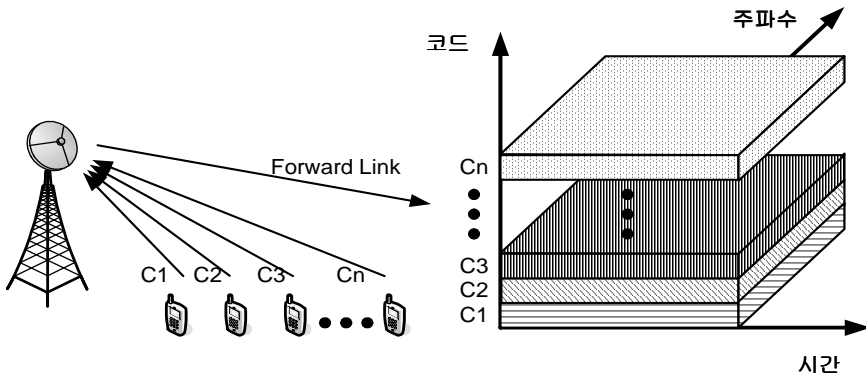


그림 2.5 CDMA 방식의 기본 개념도

Fig. 2.5 Concept of CDMA.

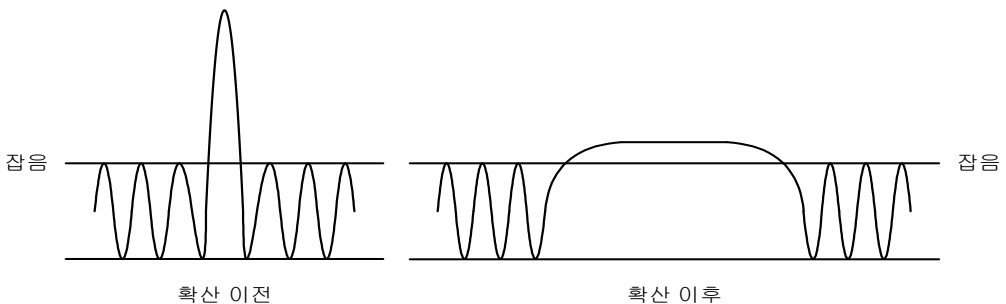


그림 2.6 스펙트럼 확산의 기본 개념도

Fig. 2.6 Concept of Spread Spectrum.

부호 분할 다중 접속(CDMA)방식은 대역을 확산시킨 후 다시 역확산하는 과정에서 처리이득이 얻어지므로 간섭이나 잡음이 신호보다 훨씬 크더라도 통신이 가능하다[10]. 이러한 원리를 이용한 스펙트럼 확산 방식으로 직접 순차 대역 확산(DS-SS ; Direct Sequence - Spread Spectrum) 방식과 주파수 도약 대역 확산(FH-SS ; Frequency Hopping - Spread Spectrum) 방식이 많이 활용되고 있다.

2.5 MC-CDMA 방식

다중 반송파 부호 분할 다중 접속(MC-CDMA ; Multi Carrier - Code Division Multiple Access) 방식은 다중 반송파를 사용하는 방식으로, 사용자 i 의 정보 비트를 다음과 같이 전송한다.

$$\text{비트 0 : } s_i(t) = -x^i(t) \quad (2.8)$$

$$\text{비트 1 : } s_i(t) = +x^i(t) \quad (2.9)$$

시간영역에서 부호에 해당하는 $x^i(t)$ 는 식 (2.10)과 같이 표현된다.

$$x^i(t) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} \beta_n^i \cos(2\pi n \Delta f t) \right] p(t) \quad (2.10)$$

여기서, β_n^i 는 -1 또는 +1의 값을 나타내는 확산 부호열에 해당한다. 정현파 $\cos(2\pi f n \Delta f)$ 는 β_n^i 를 변조하는 부반송파이다. $\mathcal{A}(t)$ 는 심볼 구간 T_s 동안의 펄스 파형이다. 그리고 Δf 는 모든 부반송파에 대해 직교성을 가지도록 선택되며 일반적으로 $\Delta f = 1/T_s$ 이다. 직접 순차 부호 분할 다중 접속(DS-CDMA) 방식과 다중 반송파 부호 분할 다중 접속(MC-CDMA) 방식에서는 사용자에게 대한 확산 부호열 β_n^i 의 값을 선택할 경우, 사용자들의 신호가 직교성이나 의사 직교성을 만족하도록 하여야 한다.

그림 2.7은 다중 반송파 부호 분할 다중 접속(MC-CDMA) 시스템의 데이터 전송에 대한 기본개념을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 직렬로 입

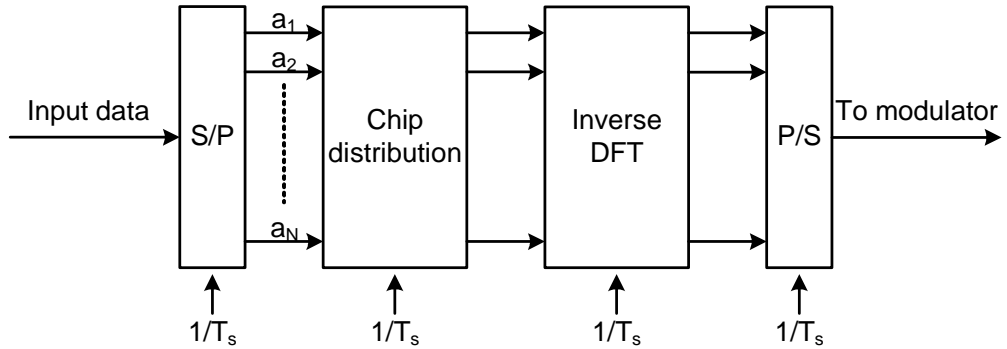


그림 2.7 MC-CDMA 송신기의 기본적인 신호처리

Fig. 2.7. Basic signal processing in a MC-CDMA transmitter.

력되는 데이터는 직/병렬변환기를 거쳐 부채널 수에 따라 병렬로 변환된다. 병렬로 변환된 데이터열에 확산부호와 곱해져 하나의 심벌을 형성하고 여기에 다시 주반송파가 곱해져 채널을 통과하게 된다[11].

2.6 OFDM 방식

직교 주파수 분할 다중화(OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 부반송파를 변조하는 다중 반송파 변조방식의 한 형태로서 각각의 부반송파는 상호 직교성을 가지며, 이들 부반송파들이 전송될 때에는 주파수 스펙트럼 상에서 서로 중첩되게 함으로써 대역폭 효율을 높이는 방식이다.

직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식은 직렬로 입력되는 데이터 심벌들을 부채널의 수에 따라 병렬로 변환하며, 각각의 부채널에 해당하는 부반송파들을 이용하여 변조를 행한다. 이렇게 부반송파로 변조된 병렬 데이터 심벌들은 프레임 단위로 구성되고, 보호구간을 삽입한 후 주반송파를 이용하여 전송하는 것이 기본 개념이다[12]. 그림 2.8은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 데이터 전송에 대한 기본 개념을 나타내고 있다.

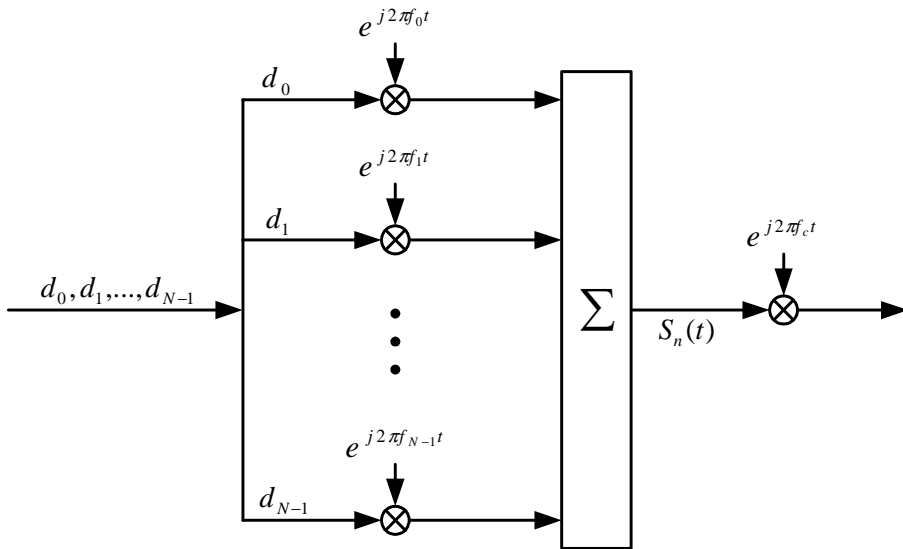


그림 2.8 OFDM 변조방식의 기본개념

Fig. 2.8 Concept of OFDM Modulation.

그림 2.8에서와 같이 직렬로 입력되는 데이터열 d_0, d_1, \dots, d_{N-1} 이 직·병렬 변환기를 거쳐 부채널의 수에 따라 병렬로 변환된다. 병렬로 변환된 데이터열을 각 채널에 해당하는 부반송파 $e^{j2\pi f_k t}$ 에 의해 곱해서 하나의 심벌을 형성하고 여기에 다시 주반송파가 곱해서 채널을 통과하게 된다. 이때 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식은 기존의 주파수 분할 다중화(FDM) 방식과 달리 상호 직교성을 가지는 부채널의 주파수를 중첩시킨다.

그림 2.9는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 부채널 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각 부채널의 부반송파 주파수들은 서로 상당부분 중첩되어 있다. 그러나 각 부반송파의 정보를 추출하는 위치에서는 해당 채널의 스펙트럼을 제외하고 인접채널의 스펙트럼이 0의 값을 가지도록 상호간 직교성이 정확히 유지되고 있다. 따라서 부반송파의 주파수들이 서로 중첩되어 있더라도 직교성이 유지된다면 인접 채널간 간섭 없이 정확한 복조가 가능하다[12].

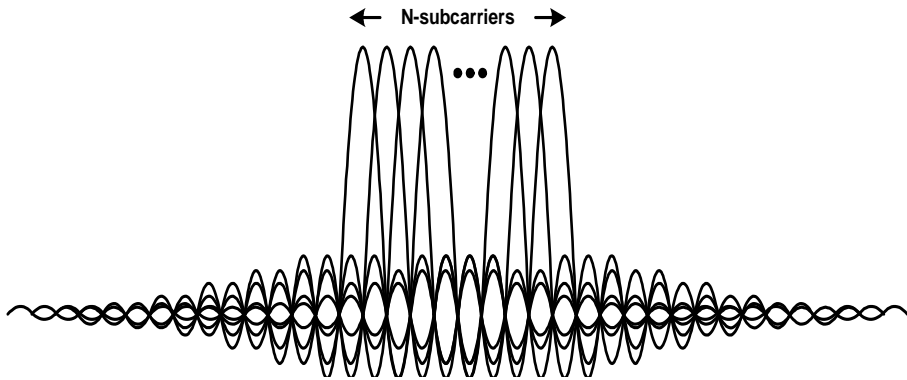


그림 2.9 OFDM 부반송파의 스펙트럼

Fig. 2.9 Spectrum of OFDM subcarriers.

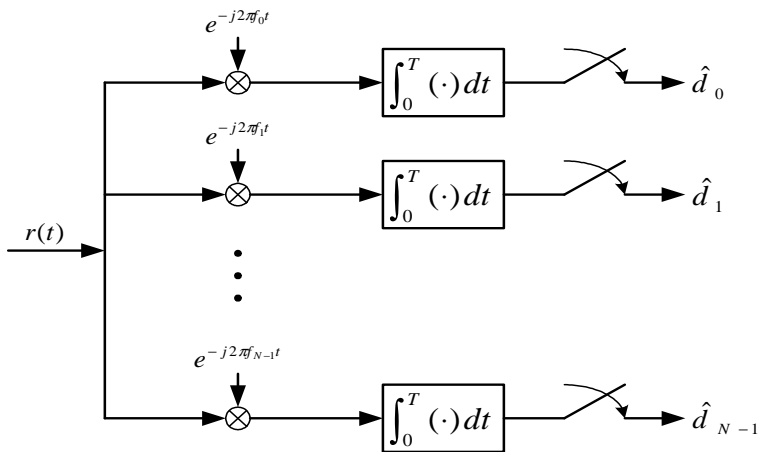


그림 2.10 OFDM 수신기의 복조원리

Fig. 2.10 Demodulation concept of OFDM receiver.

그림 2.10은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템의 복조 원리를 나타내는 것으로 동일한 채널의 신호만 간섭 없이 복원하기 위해서는 부반송파간의 직교성이 보장되어야 한다.

그림 2.11은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 시스템 구성도이다. 데이터 열은 직교 위상 편이 변조(QPSK ; Quadrature Phase Shift Keying) 방식이나 직교 진폭 변조(QAM ; Quadrature Amplifier Modulation) 방식

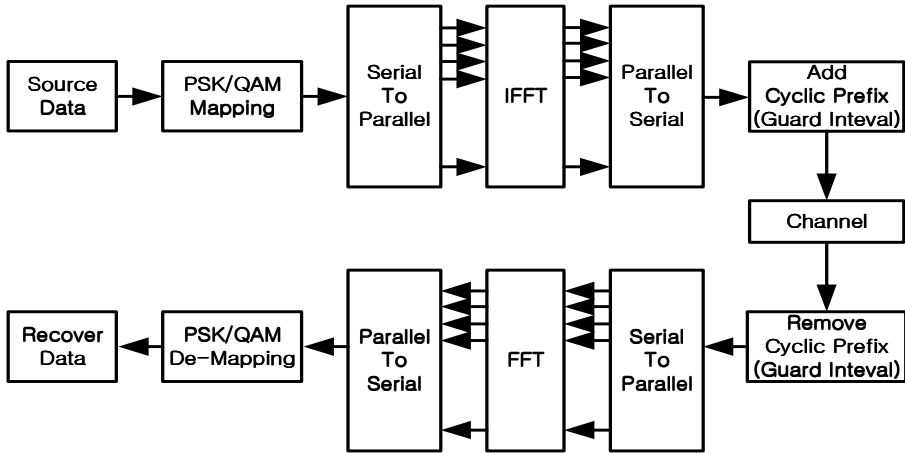


그림 2.11 OFDM 시스템의 구성도

Fig. 2.11 Block diagram of OFDM system.

같은 신호매핑을 거친다. 신호 매핑 된 출력은 다수의 부반송파를 변조하기 위해 부채널 수의 크기를 가지는 직병렬 변환기에 의해 병렬로 변환된다. 병렬로 변환된 신호에 의해 모든 부반송파는 역 고속 푸리에 변환 (IFFT ; Inverse Fast Fourier Transform)을 이용하여 동시에 변조된다 [13].

이렇게 변조된 하나의 OFDM 심벌은 전송 채널에서의 시간지연에 따른 심벌 간 간섭을 없애기 위하여 보호 구간을 더하게 된다. 이 보호 구간은 전송채널의 시간지연 특성에 따라 정해지게 되며 채널의 시간지연보다 더 크게 정하면 된다. 보호 구간을 OFDM 심벌의 앞에 삽입하여 한 개의 OFDM 프레임을 구성하고 주반송파를 이용하여 채널로 전송한다. 전송 채널을 거쳐 수신된 프레임은 보호구간을 제거하여 OFDM 심벌을 추출하고 다시 고속 푸리에 변환(FFT ; Fast Fourier Transform)을 이용하여 부반송파를 복조한다. 부반송파 복조를 거쳐 추출된 부채널 신호는 다시 역과정의 신호 매핑을 거쳐 데이터를 판정하여 정보를 복원한다.

직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식은 위와 같이 직교성을 이용하여 주파수 스펙트럼을 중첩시킴으로써 대역폭 효율을 극대화 할 수 있다. 그러나 부채널간의 스펙트럼이 중첩되어 있으므로 주파수 오프셋에 매우 민

감한 단점이 있다. 직교 주파수분할 다중화(OFDM) 시스템의 부반송파들은 각 주파수들이 상호 직교성을 가지며, 중첩 되어있기 때문에 전력의 상당 부분이 상호간에 영향을 미치게 된다.

따라서 직교 주파수분할 다중화(OFDM) 시스템은 채널환경에 따라 부채널간의 간섭이 발생하거나, 부반송파 전송신호가 동위상으로 더해지는 경우 최대전력 대 평균전력의 비율(PAPR ; Peak-to-Average Power Ratio)가 커지며, 고출력 증폭기(HPA ; High Power Amplifier)를 통과하면 비선형 왜곡이 크게 발생되어 시스템 성능이 크게 저하될 수 있다[14].

제 3 장 CI-OFDM 시스템

반송파 간섭 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM ; Carrier Interferometry - Orthogonal 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. CI 신호의 구성 및 특성은 3.1절에서 설명하고 3.2절에서는 OFDM 신호의 구성 및 특성을, 3.3절에서 CI-OFDM 시스템의 특성을 설명한다.

3.1 CI 신호의 구성 및 특성

CI 신호는 Δf 로 주파수를 동일하게 나눈 N개의 부반송파들이 중첩된 신호로서, 식 (3.1)과 같이 표현된다.

$$c(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \cos(2\pi i \Delta f t) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2} 2\pi \Delta f t\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} 2\pi \Delta f t\right)} \cdot \cos\left(\frac{N-1}{2} 2\pi \Delta f t\right) \quad (3.1)$$

CI 신호에 대한 포락선은 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E(t) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}2\pi\Delta ft\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}2\pi\Delta ft\right)} \quad (3.2)$$

그림 3.1과 3.2는 부반송파의 수 $N=16$ 인 경우의 CI 신호와 포락선을 나타낸 것이다. 식 (3.2)와 그림 3.2에서 알 수 있듯이 CI 신호의 포락선은 주기가 $\frac{1}{\Delta f}$ 이다. 각 주기 동안 주엽의 구간은 $\frac{2}{N\Delta f}$ 이며, $N-1$ 개의 부엽은 $\frac{1}{N\Delta f}$ 의 구간을 가진다. 주엽의 진폭에 대해 정규화한 l 번째 부엽의 최대 진폭은 식 (3.3)과 같다.

$$A(l) = \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(l+0.5)\right)} \quad (3.3)$$

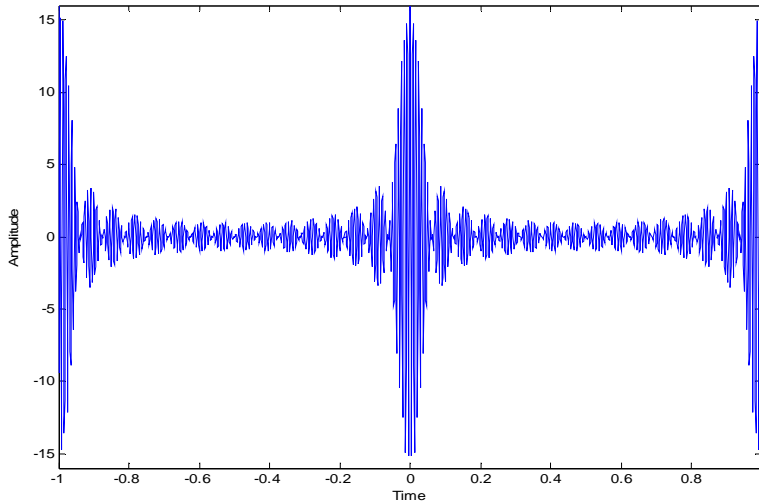


그림 3.1 CI 신호(N=16)

Fig. 3.1 CI signal(N=16).

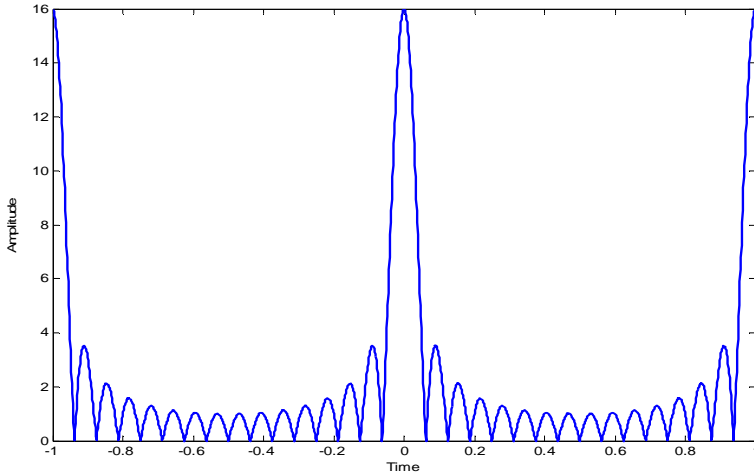


그림 3.2 CI 신호의 포락선

Fig. 3.2 Envelope of CI signal.

위상오프셋이 적용된 CI 신호의 포락선은 식 (3.4)와 같다.

$$E(t) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}(2\pi\Delta ft + \Delta\theta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}(2\pi\Delta ft + \Delta\theta)\right)} \quad (3.4)$$

CI 신호에 위상 오프셋을 적용하게 되면, i 번째 부반송파는 $i\Delta\theta$ 만큼의 위상 오프셋이 적용된다. 이때 CI 신호의 포락선은 위상오프셋에 대해 $\Delta t = \frac{\Delta\theta}{2\pi\Delta f}$ 만큼 시간 이동된 형태를 나타낸다. 따라서 $\Delta\theta$ 의 선택에 표현이 가능하다.

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템이 여러 명의 사용자를 상대할 경우, 한명의 사용자는 이동하지 않는 CI 신호를 자신의 코드로 할당 받고, 또 다른 사용자는 시간 이동된 CI 신호를 자신의 코드로 할당 받게 되며, 신호는 첫 번째 사용자의 CI 포락선이 시간 이동된 형태를 나타낸다. 사용자들 신호간 상호 관계는 식 (3.5)와 같다.

$$\begin{aligned}
R_{i,j}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)dt = \frac{1}{2\Delta f} \sum_{i=0}^{N-1} \cos(2\pi i\Delta f\tau) \\
&= \frac{\sin\left(\frac{N}{2}2\pi\Delta f\tau\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}2\pi\Delta f\tau\right)} \cdot \cos\left(\frac{N-1}{2}2\pi\Delta f\tau\right)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

식에서 sine항에 의해 $\frac{n}{N\Delta f}$ (단, $n=1,2, \dots, N-1$) 의 위치에서 $N-1$ 개의 0 을 가지고, cosine 항에 의해 $\frac{2n-1}{N\Delta f}$ (단, $n=1,2, \dots, N-1$) 의 위치에서 $N-1$ 개의 0 을 가지므로 모두 $2(N-1)$ 개의 0 의 값을 가진다. 따라서 시간 축에서, 두 번째 사용자가 첫 번째 사용자에게 대해 직교성을 유지하면서 위치할 수 있는 곳은 $2(N-1)$ 개가 존재하게 된다. 그림 3.3은 위상 오프셋이 적용된 CI 신호의 포락선으로 시간 이동된 파형을 나타내고 있다.

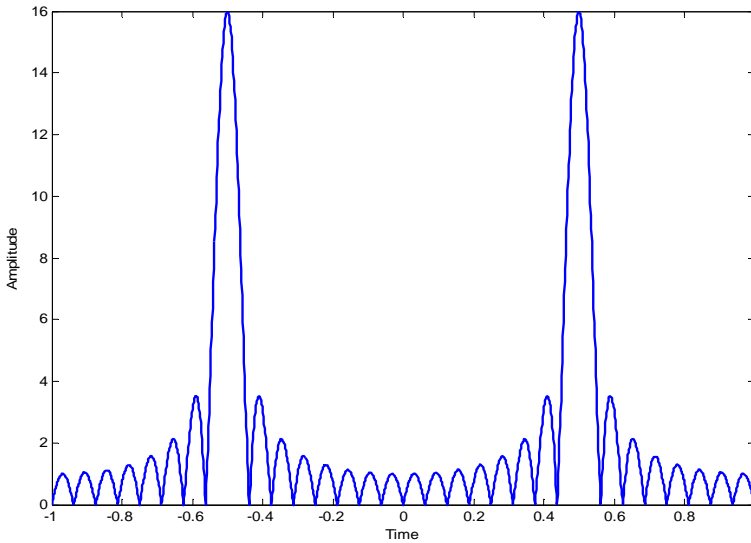


그림 3.3 위상 오프셋이 적용된 CI 신호의 포락선
 Fig. 3.3 Envelope of CI signal with phase offset.

이러한 특성은 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템이 N 명의 사용자에게는 동시에 직교성을 부여할 수 있고, 여기에 추가적으로 $N-1$ 명의 사용자에게 동시에 의사 직교성을 부여할 수 있음을 나타낸다. 따라서 N 명의 직교사용자뿐만 아니라 필요에 따라서 더 많은 사용자들에게 의사 직교성을 부여할 수 있다.

그림 3.4는 세 명의 사용자에게 대한 CI 신호의 직교성을 나타내고 있다.

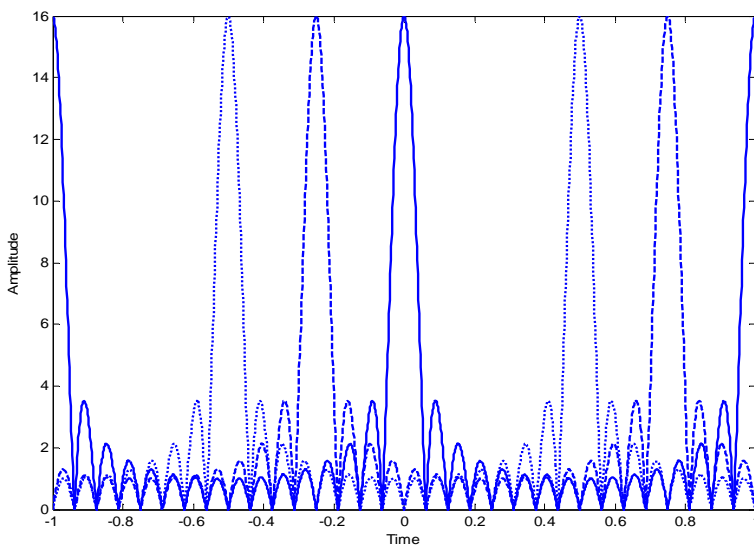


그림 3.4 CI 신호의 직교성(사용자 3명)

Fig. 3.4 Orthogonality of CI signal(user=3).

3.2 OFDM 신호의 구성 및 특징

OFDM 시스템의 신호는 QPSK 나 QAM 에 의하여 변조된 부반송파의 합으로 구성된다. 만약 d_i 를 QAM 심벌, N 을 부반송파의 수, T 는 심벌 구간, f_c 를 반송파 주파수라 하면, 시간 $t = t_s$ 에서 시작하는 OFDM 심벌은 식 (3.6)과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_{i+N/2} \exp(j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{T})(t-t_s)), \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = 0, \quad t < t_s \wedge t > t_s + T \quad (3.6)$$

또한, 등가 복소 기저대역에서의 표현은 식 (3.7)과 같이 사용한다.

$$s(t) = \left\{ \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_{i+N/2} \exp(j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)) \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s(t) = 0, \quad t < t_s \wedge t > t_s + T \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서 실수부와 허수부는 OFDM 신호의 동위상(in-phase)과 직교위상(quadrature phase)에 해당하며, 최종적인 OFDM 신호를 생성하기 위해서는 적절한 반송파를 갖는 코사인파와 사인파를 곱해야 한다.

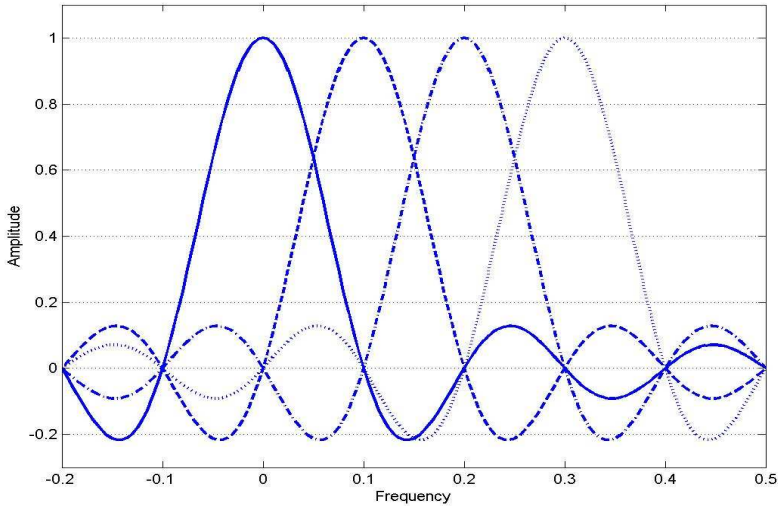


그림 3.5 각 부반송파들의 스펙트럼

Fig. 3.5 Spectrum of individual subcarriers.

생성된 OFDM 심벌의 스펙트럼은 각 부반송파에 위치한 일련의 임펄스와 T 초 구간동안 1이고 나머지 구간에서 0인 구형 펄스의 스펙트럼과 $1/T$ 의 모든 정수배 주파수에서는 0이 됨을 그림 3.5에 나타내었다. 그림에서 각 부반송파의 sinc 형태의 스펙트럼이 서로 중첩되는 것을 볼 수 있다. OFDM 수신기는 기본적으로 각 부반송파의 최대 값에 해당하는 곳에서 스펙트럼 값을 계산함으로 각 부반송파를 다른 부반송파의 간섭 없이 복조할 수 있다.

OFDM의 각 부반송파가 직교성을 만족하고 수신단의 복조 과정에서 주파수 오프셋이 발생하지 않았을 경우 복원 데이터는 식 (3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{d}_{n,i} &= \frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} s(t) \cdot e^{-j2\pi f_i t} dt \\ &= \frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} \sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} e^{j2\pi f_k t} \cdot e^{-j2\pi f_i t} dt \end{aligned} \quad (3.8)$$

이 때, 입력신호 $s(t)$ 는 각 부채널로 전송되는 모든 심벌 열을 포함하고 있지만 OFDM 신호의 각 부반송파가 상호 직교성을 유지하고 있다면 동일한 채널로 전송되어 온 심벌만 추출할 수 있다.

OFDM 신호는 독립적으로 변조된 다수의 부반송파들의 중첩으로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해지면 신호가 크게 발생하여 최대전력 대 평균전력의 비율(PAPR)이 커진다. N 개의 신호가 동위상으로 더해지면 최대전력은 평균전력의 N 배가 된다. OFDM 심벌에 대한 PAPR 은 신호의 최대전력을 평균전력으로 나눈 것으로 식 (3.9)와 같이 정의된다.

$$PAPR = \frac{\max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2}{\text{mean}_{0 < t < T_s} |s(t)|^2} \quad (3.9)$$

OFDM 신호의 평균전력은 식 (3.10)과 같다.

$$P_{mean} = NP_0 \quad (3.10)$$

하나의 반송파에 대한 평균전력은 식(3.11)과 같다.

$$P_0 = \frac{1}{2}A_0^2 \quad (3.11)$$

그리고, OFDM 신호의 최대전력은 식 (3.12)와 같다.

$$P_{OFDM_{max}} = \left(\sum_{i=1}^N A_0 \right)^2 = (NA_0)^2 = N^2A_0^2 \quad (3.12)$$

3.3 CI-OFDM 시스템

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 3.6과 같다.

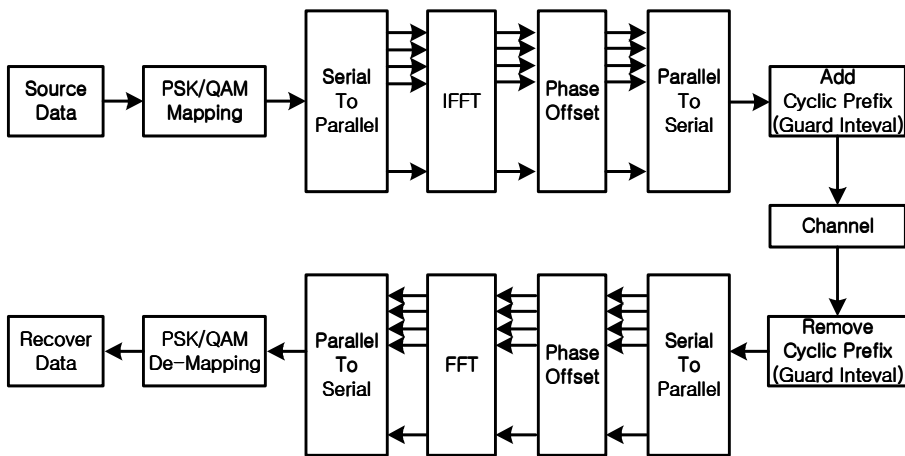


그림 3.6 CI-OFDM 시스템의 구성도

Fig. 3.6 Block diagram of CI-OFDM system.

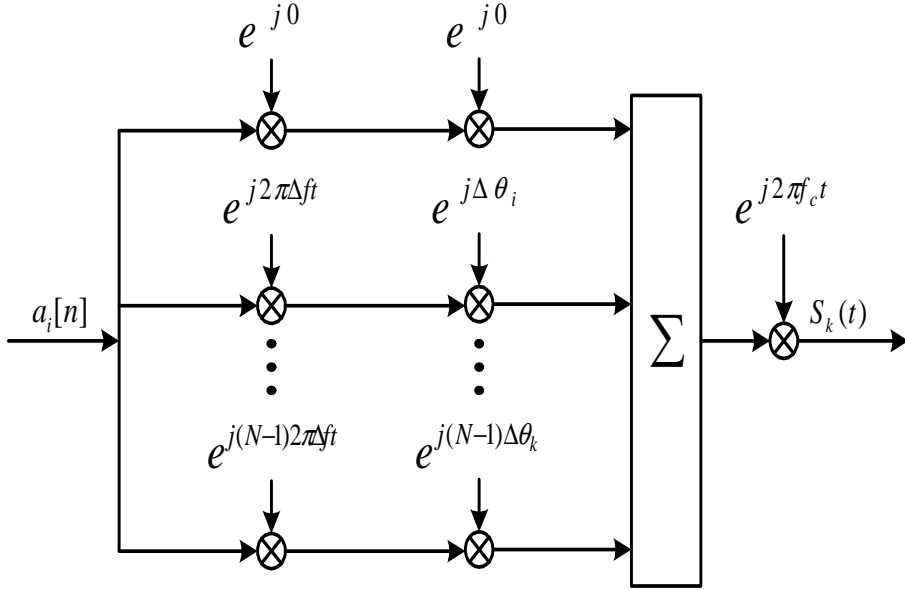


그림 3.7 k 번째 사용자에게 대한 CI-OFDM 송신기

Fig. 3.7 CI-OFDM transmitter on the k -th user.

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 시스템에서 k 번째 사용자에게 대한 송신기는 그림 3.7과 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 (3.13)과 같다.

$$s_k(t) = a_k[n] \sum_{i=0}^{N-1} \cos(2\pi(f_c + i\Delta f)t + i\Delta\theta_k) p(t) \quad (3.13)$$

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 (3.13)을 간략화 하면 식 (3.14)과 같이 표현할 수 있다.

$$s_k = a_k[n] c(t) p(t) \quad (3.14)$$

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 (3.15)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{N-1} a_k[n] a_i \cos(2\pi(f_c + i\Delta f)t + i\Delta\theta_k + \phi_i) + \eta(t) \quad (3.15)$$

여기서, a_i 는 채널에 대한 이득이고 ϕ_i 는 i 번째 반송파의 위상 오프셋이다. 그리고 K 는 시스템을 사용하는 전체사용자의 수이며, $\eta(t)$ 는 AWGN 을 나타낸다. k 번째 사용자에 대한 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 수신기는 그림 3.8과 같다.

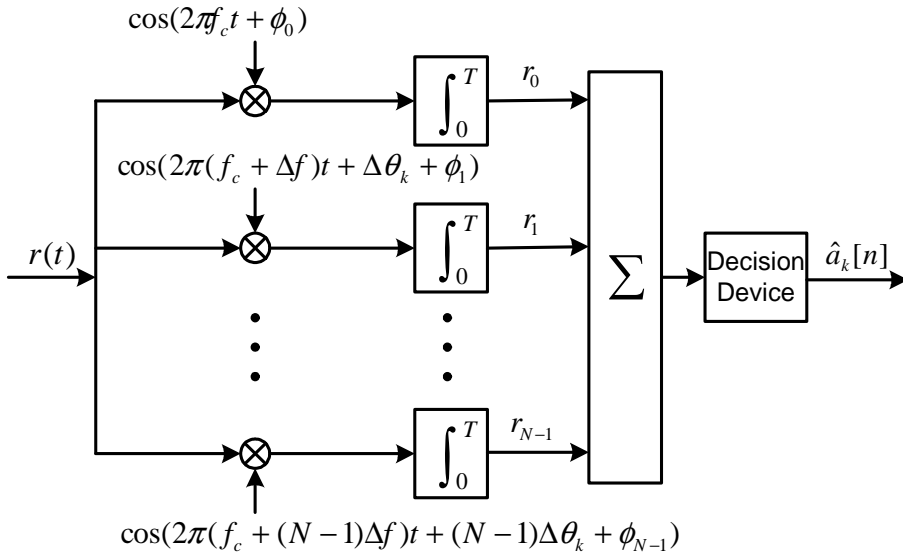


그림 3.8 k 번째 사용자에 대한 CI-OFDM 수신기

Fig. 3.8 CI-OFDM receiver on the k -th user.

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 (3.16)과 같다.

$$r_i = a_i a_k[n] + \sum_{j=1, j \neq k}^K a_j[n] a_i \cos(i(\Delta\theta_j + \Delta\theta_k)) + \eta(t) \quad (3.16)$$

여기서 η_i 는 평균이 0 이고 분산이 $\frac{N_0}{2}$ 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 (3.17)과 같이 모든 경로의 출력을 합하여 생성된다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i \quad (3.17)$$

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 사용자 간 간섭을 제거하기 위해 경로 변수를 결합하는 방식으로 페이딩이 발생하더라도 사용자간에 직교성을 복원한다. 그러나 잡음은 일반적으로 결합하는 과정에서 확장된다. 이 결합방식의 결정변수를 식 (3.18)과 같이 선형 결합하여 나타낸다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i / a_i \quad (3.18)$$

최소 자승 오류 결합법(MMSEC ; Minimum Mean Square Error Combining)을 사용할 경우 결정변수는 식 (3.19)와 같다.

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} r_i \cdot \frac{a_i}{R_i a_i^2 + N_0/2} \quad (3.19)$$

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 평균전력은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 의 평균전력과 동일하다.

그러나 최대전력의 경우에는 각각의 사용자를 구분하기 위해서 사용되는 위상 오프셋을 적용함에 따라 사용자 i 의 신호전력이 최대값을 가지면 다른 사용자 j 의 신호전력은 최소의 값을 갖는다. 따라서 반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 신호의 최대전력은 식 (3.20)과 같다.

$$P_{CI-OFDM_{\max}} = \frac{1}{2} \max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2 \quad (3.20)$$

제 4 장 컴퓨터 모의실험 및 성능분석

4.1 컴퓨터 모의실험

본 논문에서 제안하고 있는 차세대 무선 멀티미디어 통신을 위한 CI-OFDM 시스템을 구성하고 시스템의 성능을 효율적으로 분석하기 위해 Matlab 6.5를 이용하여 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. 무선 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 부반송파 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 매핑방식은 QPSK 를 적용하였다.

다중경로 환경으로는 직접파 외에 지연반사파를 고려하였으며 정규화된 최대 도플러 주파수 $f_D T_s$ 는 0.1 로 하였다. 시뮬레이션의 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

[n_s] 로 하였다.

반송파 간섭성 직교 주파수 분할 다중화(CI-OFDM) 방식은 직병렬 변환기에 의한 부채널의 수를 64 개로 동일하게 하였으며, CI 신호를 적용하기 위한 반송파 간섭신호의 수는 16 개로 설정하여 직교성이 유지되도록 위상 오프셋을 부여하였다. 시뮬레이션을 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.

4.2 DS-CDMA와 CI-OFDM의 성능 비교

그림 4.1은 사용자의 수를 32 명으로 고정하고 E_b/N_0 에 따른 비트오율(BER) 을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 반송파 간섭

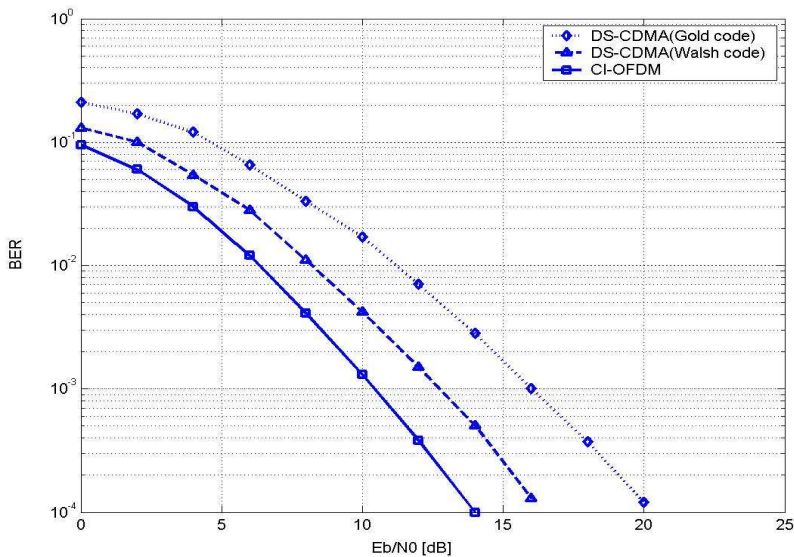


그림 4.1 E_b/N_0 에 대한 BER

Fig. 4.1 BER due to E_b/N_0 .

성 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 4.2는 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.

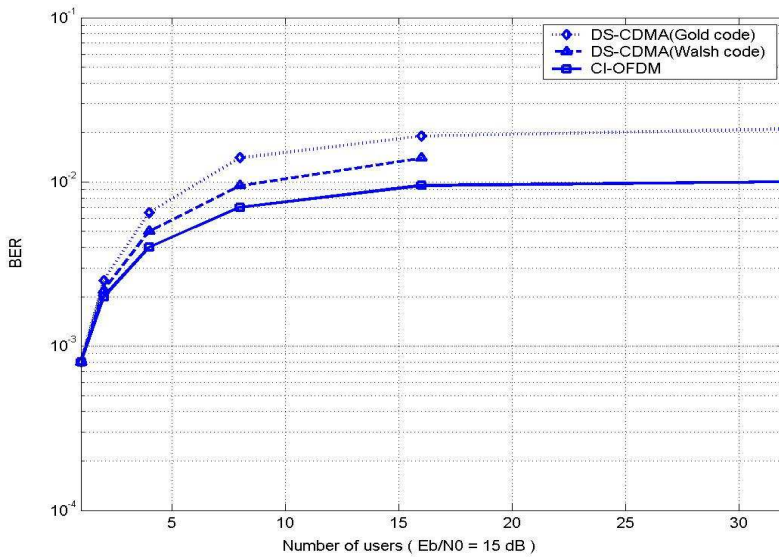


그림 4.2 사용자 수에 대한 BER($E_b/N_0 = 15[dB]$)

Fig. 4.2 BER due to user number($E_b/N_0 = 15[dB]$).

4.3 MC-CDMA와 CI-OFDM의 성능 비교

그림 4.3은 레일리 페이딩 채널에서 E_b/N_0 을 10 [dB] 로 고정하고 사용자의 수가 증가함에 따라 각 시스템의 비트오율(BER)을 비교한 것이다. 다중 반송과 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 4.4는 부가적 백색잡음(AWGN) 채널환경에서 비트오율(BER) 특성을 비교한 것이다. 비트오율(BER) 이 10^{-4} 일 때 약 4 [dB] 정도의 성능차를 보여주고 있다. 그림 4.5는 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.

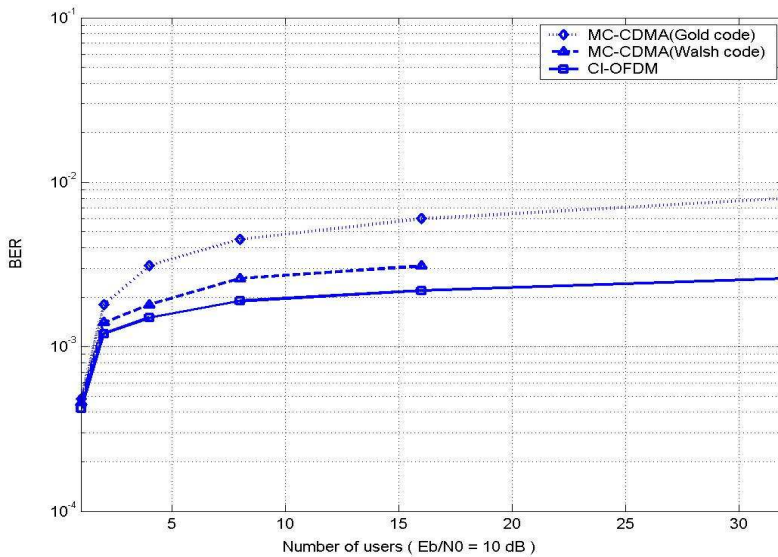


그림 4.3 사용자 수에 따른 BER($E_b/N_0 = 10[dB]$)

Fig. 4.3 BER due to user number($E_b/N_0 = 10[dB]$).

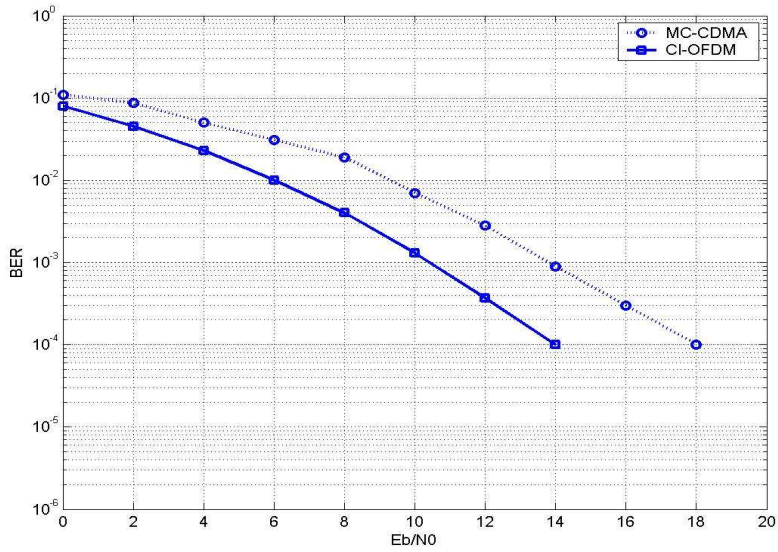


그림 4.4 AWGN 채널에서 BER 성능

Fig. 4.4 BER performance in AWGN channel.

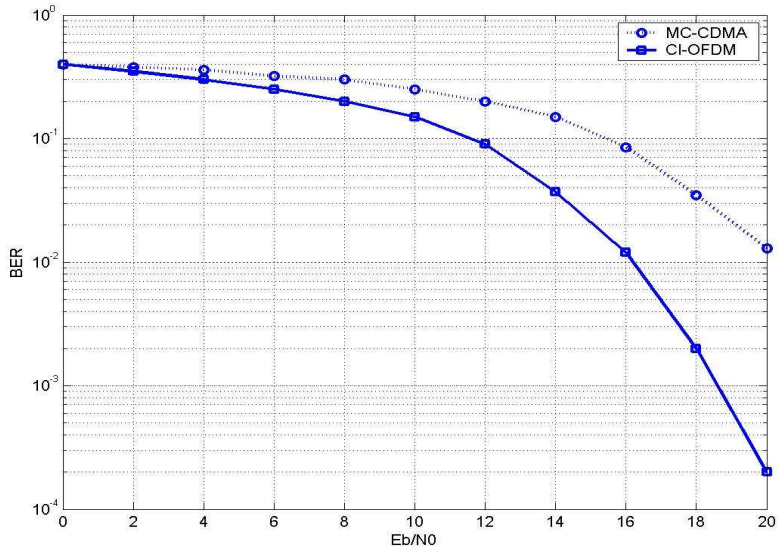


그림 4.5 Rayleigh fading 채널에서 BER 성능

Fig. 4.5 BER performance in rayleigh fading channel.

4.4 OFDM과 CI-OFDM의 성능 비교

그림 4.6은 부가적 백색잡음(AWGN) 채널에서, 그림 4.7은 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 열화 되며, 또한 각 비트들에 발생하는 플랫폼 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.

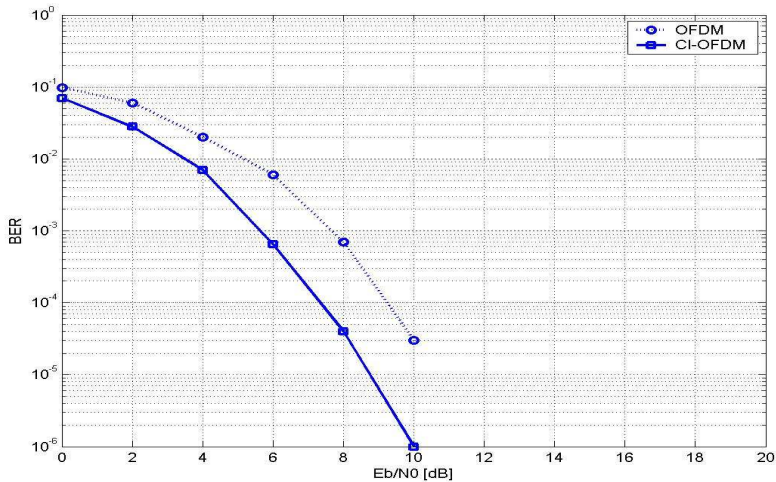


그림 4.6 AWGN 채널에서 시스템성능

Fig 4.6 Performance of system in AWGN channel.

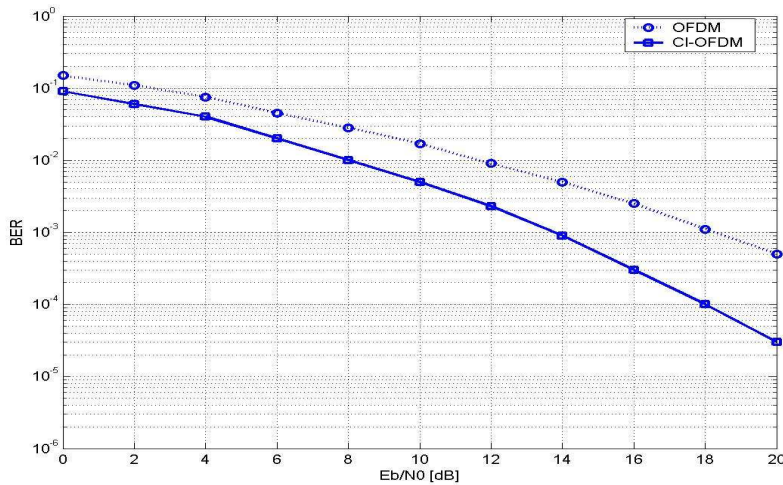


그림 4.7 Rayleigh 페이딩 채널에서 시스템 성능

Fig. 4.7 Performance of system in Rayleigh fading channel.

그림 4.8은 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 8.27이다. 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 4.9는 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.

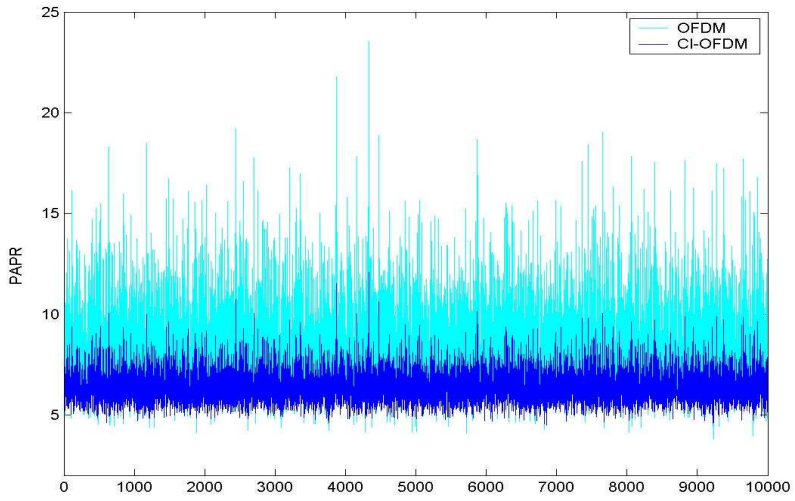


그림 4.8 OFDM과 CI-OFDM의 PAPR
 Fig. 4.8 PAPR of OFDM and CI-OFDM.

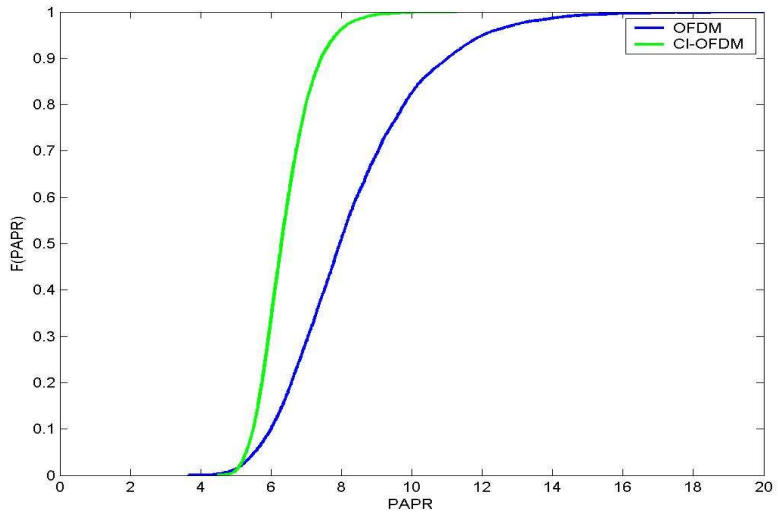


그림 4.9 OFDM과 CI-OFDM의 PAPR에 대한 CDF
 Fig. 4.9 PAPR CDF of OFDM and CI-OFDM.

제 5 장 결 론

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 용량면에서 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 오율 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 확산부호를 사용하여 다중 접속한다.

컴퓨터 모의실험 결과에 의하면, 의사직교성을 가지는 골드 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 위상 오프셋을 가지는 형태이며 부반송파들이 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 위상오프셋을 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.

감사의 글

대학원에 입학하고 5학기 2년 6개월의 기간 동안 너무나도 부족한 저를 관심어린 지도와 격려, 조언으로 잘 이끌어 주신 조형래 지도교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 또한 본 논문을 심사하시면서 세심한 부분까지 알려주시고 배려하셨던 김기문 교수님, 김기만 교수님께 감사드립니다. 그리고 부족한 전공지식의 배양과 인격수련을 위해 많은 지도를 해주신 김동일 교수님, 강인호 교수님, 정지원 교수님, 민경식 교수님, 윤영 교수님께 감사드립니다. 그리고 어려울 때 교수님 때로는 선배님처럼 가까이에서 지도해주신 PSB 부산방송의 원영수 국장님께 감사의 말씀을 드립니다.

이동통신 연구실이라는 좁은 공간을 매개로 인연을 맺은 선·후배의 관계는 지금까지 그 어떤 관계보다 더 끈끈하게 엮어진 것 같습니다. 먼저 가까이서 학문적 부족함을 채워 주고 같이 졸업논문을 준비하며 고생하셨던 태경이형과, 사소한 것 하나하나 챙기며 큰 불평불만 없이 형처럼 대해주었던 동식이와 수홍이, 후배이지만 큰 형님으로서 자상하게 돌봐 주시던 종옥이 형, 그리고 지금은 졸업한 정원이와 순영이 모두 고맙고 감사하게 생각합니다. 또, 항상 바쁘지만 특별히 신경많이 썼던 학과조교 민지와 명승이, 마이크로파 실험실에서도 항상 웃음과 격려로 아껴주셨던 준형 형님, 동한 형님, 창묵 형님, 그리고 동생같이 친구같이 생활했던 Lui, 재현, 대훈, 정현, 신자 모두에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 위성통신실험실의 인기와 덕훈이, 안테나실험실의 철근이와 동진이 진우, DSP 실험실의 형준이와 제국, 그리고 MMIC 실험실의 총렬이와 영배, 동환이 모두 즐겁고 보람찬 대학원 생활을 하는데 도움을 준 모든 학우들 모두에게 고마운 마음을 전합니다.

그리고 그 누구보다 지금까지 제가 가고자 하는 길을 묵묵히 지켜봐 주시고, 후원해주시며 자식에 대한 자랑스러움으로 걱정과 사랑을 아끼지 않으셨던 존경스러운 부모님과, 사랑하는 큰누나, 작은누나, 형, 그리고 매형과 귀여운 조카들과 지금의 기쁨을 나누고 싶습니다.

이제 새로이 사회에 발 딛는 이 순간 보다 성숙되고 사려 깊은 자세로 매사에 정진할 것을 다짐하면서, 지금까지 저를 이끌어 주신 모든 분들에게 다시 한 번 감사드립니다.