

主題

4세대 무선 통신 시스템과 OFDM 기술

연세대학교 육영수, 조남신, 조재희, 천현수, 홍대식

차례

- I. 서론
- II. OFDM 방식의 개요
- III. OFDM 방식을 적용한 시스템
- IV. 4세대 통신 시스템을 위한 OFDM 기술
- V. 결론

I. 서론

최근의 무선 전송 기술은 2세대 디지털 이동 전화 시장의 폭발적인 증가와 더불어 3세대 이동 통신인 IMT-2000 서비스의 상용화를 목전에 두면서 급속도로 발전하고 있다. 또한, 인터넷이 각 가정에서 일반화되면서 무선 이동 통신을 통해 인터넷에 접속하고자 하는 사용자들의 요구가 크게 증가하고 있는 실정이다. 특히 최근의 네트워크는 주로 다양한 멀티미디어 데이터를 제공하는 형태로 변화가고 있어 앞으로의 무선 이동 통신 시스템은 음성 위주의 서비스에서 멀티미디어 데이터 위주의 서비스로 변화할 것으로 보인다. 또한, 3세대 이후의 무선 전송 시스템은 유선망과 무선망이 통합되는 개념으로 이동성의 증가, 초고속/대용량 데이터 전송의 형태로 네트워크가 진화해 나갈 것으로 예상된다. 이와 같이 4세대 통신은 기존 유선의 B-ISDN 정도의 서비스를 무선으로 가능하게 하는 광대역 무선 통신 서비스(WBS : Wireless Broadband Service)로 예측되고 있

다. 즉, 이동성과 초고속 데이터 전송을 목표로 4세대 통신 시스템은 3-60GHz의 밀리미터파를 이용하여 궁극적으로 초고속 기간망에 접속하여 수백 Mbps로 데이터를 송수신할 수 있는 시스템이 될 것으로 보여지며, 이에 대한 연구가 다방면에서 진행되고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 기본적으로 통신이 이루어지는 장소, 이동 속도, 용도 등 다양한 통신 환경에 따라 서로 다른 시스템 간의 연동이 이루어져야 한다. 결국 4세대 통신 시스템은 기존의 분리된 개별 시스템으로서의 무선 통신망이 아닌 4세대 기간망에 다양한 Inter-working Function을 추가하여 무선 이동망(Wireless Mobile), 무선 광대역 접속망(BWA : Broadband Wireless Access) 및 무선 사설망(WPN : Wireless Private Network)등이 연동하는 형태로 발전할 것으로 보인다. [그림 1]은 앞서 언급한 4세대 무선 통신 시스템의 동향을 개념적으로 보여주고 있다. 이러한 시스템의 구축과 함께 4세대 통신 시스템의 기본 목표는 고속 전송(High Transmission Rate), 높

은 주파수 효율(High Spectral Efficiency), 고속 이동 지원(High Mobility) 및 글로벌 로밍(Global Roaming) 서비스로 규정지을 수 있다. 이러한 기본적인 목표 외에 다양한 세부 목표가 정의되고 있는데, 현재 ITU-WP8F를 중심으로 논의되고 있는 4세대 통신 시스템인 System Beyond IMT-2000의 요구 사항은 다음과 같이 요약될 수 있다(1).

- 유선망 수준의 고속 전송(이동중 : 2Mbps 이상, 정지상태 : 20Mbps 이상)
- 차세대 인터넷 구조 지원(Ipv6, QoS, Mo-IP)
- 3세대보다 5~10배의 높은 용량(Capacity) 지원
- 높은 주파수 효율
- 3GHz 이상 대역에서 전세계적으로 동일한 주파수 대역 사용
- 패킷 스위치 방식의 사용
- 기존의 고정 접속망 및 사설망과의 효율적인 연동
- 새로운 서비스 적용의 용이성
- 3세대의 1/10 수준의 서비스 요금

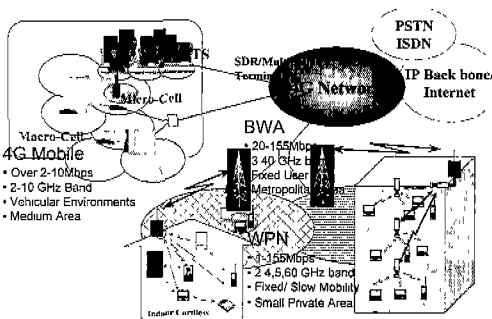


그림 1. 4세대 무선 통신 시스템의 개념

4세대 시스템의 무선 접속 분야에서 가장 중요한 요소는 유선망 수준의 전송 속도를 지원하는 것이다. 최근 여러 기관의 목표를 참고하면 이는 대략 5~

20MHz의 대역폭을 통해 이동 중에는 2Mbps 이상, 고정 접속 시 20Mbps 이상의 전송률을 지원하는 시스템이 될 것이다. 이러한 문제의 해결은 현재 다각도로 진행되고 있으나, 변복조 방식과 다중 사용자 접속 방식의 관점에서 기존의 CDMA나 TDMA 방식의 낮은 주파수 효율 문제를 해결하기 위해 OFDM 변복조 방식을 근간으로 하는 물리계층 구조의 사용에 대한 관심이 높아지고 있다. OFDM 방식은 기존의 단일 반송파를 사용하는 시스템과 달리 다중 반송파를 사용하여 전송하는 기법으로, 주파수 효율이 높으며 채널 추정 방식이 간단한 점 등 다양한 장점을 가지고 있어서 4세대 시스템에 사용되기에 적합한 것으로 알려져 있다. 특히 4세대 시스템이 상용화될 무렵에는 음성 서비스의 비중이 점차 낮아지고 패킷 방식의 데이터 전송 서비스의 비중이 95% 이상을 차지할 것으로 보이므로, 블록 전송 방식을 사용하는 OFDM 방식의 비중은 점차 높아질 것으로 보여진다.

본 고에서는 이러한 관점에서 4세대 통신과 관련한 OFDM 방식의 특징을 살펴보고, OFDM 방식을 사용한 고속 전송 시스템의 전망과 연구 분야를 살펴본다. 본 고의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OFDM 방식의 기본적인 특징을 알아보고, 3장에서는 현재 사용되거나 사용될 것으로 보이는 OFDM 방식의 통신 시스템을 살펴본다. 4장에서는 OFDM 방식을 4세대 통신 시스템에 적용하기 위한 여러 기관의 동향과 연구 주제에 대해 살펴보고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 방식의 개요

OFDM 방식은 전송신호를 다수개의 반송파에 실어 보내는 다중 반송파(Multi-Carrier) 변조 방식이다. 이에 대한 기본적인 원리는 1960년대 중반 R. W. Chang, B. R. Saltzberg 등에 의해 이루어

졌는데, 이들은 전송신호를 서로 직교하는 다수개의 반송파에 병렬로 전송하는 방법을 제안하고 그 성능을 분석하였다[1,2]. 이는 현재 사용하는 OFDM 방식과 많은 차이를 가지나, 직교전송방식이 높은 전송 효율을 가짐을 보였다. 이후 S. B. Weinstein 등이 이를 발전 시켜 직교전송방식을 이산 푸리에 변환을 이용하여 구현할 수 있음을 보이고 신호간 간섭(ISI)을 제거하기 위해 보호구간을 사용할 것을 제안하였다[4]. 이후 A. Peled 등이 순환보호구간(Cyclic Guard Interval)을 사용할 것을 제안하여 현재 사용되는 형태의 OFDM이 등장하였다[5].

1. OFDM신호의 생성 및 복원

OFDM은 N개의 심볼을 N개의 서로 직교하는 부반송파에 실어 병렬로 전송하는 기법이다. $X_{n,k}$ 을 n번째 시간에 k번째 부 반송파로 전송할 심볼이라 하면 OFDM 변조된 신호는 다음과 같은 이산 역푸리에 변환으로 표현되고 실제 구현은 효율적인 IFFT를 이용한다.

$$x_n(m) = N \times \text{IFFT}(X_{n,k}) \quad (1)$$

OFDM신호의 복원은 이산 푸리에 변환을 통해 나타나며 실제 구현은 역시 효율적인 FFT를 이용한다[4,6,7,8].

$$\begin{aligned} X_{n,k} &= \frac{1}{N} \text{FFT}(x_n(m)) \\ &= \frac{1}{N} \text{FFT}(N \times \text{IFFT}(X_{n,k})) \end{aligned} \quad (2)$$

일반적인 OFDM 시스템에서는 채널의 지연으로 인해 발생하는 인접 심볼간 간섭(Intersymbol Interference : ISI)을 방지하기 위해 g만큼의 순환보호구간을 사용한다. 즉 식 (1)로부터 다음과 같

이 순환 보호구간이 첨가된 OFDM신호가 만들어진다.

$$x_n(m) = \begin{cases} x_n(N+m-g-1) & 0 \leq m \leq g \\ x_n(m-g) & g \leq m < N+g \end{cases} \quad (3)$$

수신단에서는 첨가된 순환보호구간을 제거한 후 식(2)의 과정을 거쳐 수신신호가 복원된다.

[그림 2]의 블록도는 이상의 OFDM신호의 생성 및 복원 과정을 도시한다. 그림에서 송신단의 저역 통과 여파기 및 수신단의 표본화기는 이산 및 연속 신호간 변환에 필요하다.

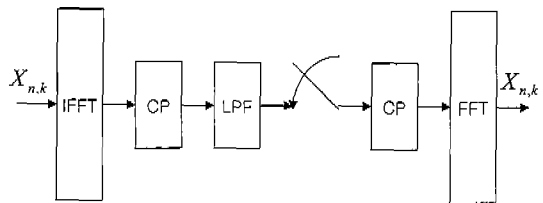


그림 2. OFDM 신호의 생성 및 복원 과정

2. OFDM 기법의 특징

가. 주파수 효율

M-ary신호방식을 사용할 때 OFDM의 대역폭 효율은 다음과 같다.

$$\beta = \frac{\log_2 M}{1 + \alpha/N} < \log_2 M \quad \text{bit/Hz} \quad (4)$$

여기서 α 는 부반송파의 roll-off 인자이다. 일반적으로 단일 반송파 기법의 경우 대역제한 여파기의 사용으로 효율이 떨어짐에 비해 OFDM방식의 경우 N이 커 질수록 M-ary신호방식의 이상적인 대역폭 효율에 가까워짐을 알 수 있다. 순환보호구간의 사용으로 인해 대역폭 효율은 식 (4)보다 떨어지지만 단일 반송파 기법과 비교하여 더 낮은 효율을 얻을 수

있게 된다[8].

나. 순환 보호구간과 채널 등화

보호구간의 사용은 대역폭 효율의 저하를 가져오는 반면 다른 측면에서는 OFDM 시스템이 다중경로 페이딩 현상에 매우 강건한 특성을 갖도록 해주는 장점이 있다. 즉 OFDM 시스템이 동작하는 채널환경의 최대 채널 지연(maximum delay spread)보다 보호구간이 길다면 보호구간이 제거되어 식(2)의 FFT과정에 입력되는 신호는 ISI를 겪지 않게 된다. 이와 같은 특징으로 인해 다중경로 페이딩 채널을 통과한 OFDM신호를 푸리에 변환과정을 통해 복원하면 다음과 같은 등가 병렬 백색잡음 채널로 표시할 수 있다[7].

$$Y_{n,k} = H_{n,k}X_{n,k} + N_{n,k} \quad (5)$$

이때 $H_{n,k} = DFT[h_{n,p}]$ 로 채널의 주파수 응답이다. 이때 채널이 한 OFDM심볼 동안 시 불변임을 가정했다. 보호구간을 사용하지 않을 경우 ISI가 발생하고 이는 인접 부채널간 간섭을 일으키게 된다. 단일 반송파의 경우 전송률이 높을 경우 등화기의 탭수가 매우 커져 구현에 어려움을 겪는데 반하여 OFDM신호의 채널등화는 이러한 특징으로 인해 매우 간단한 1-tap 등화기를 이용하여 구현할 수 있

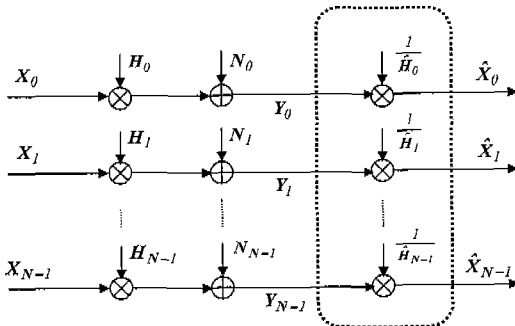


그림 3. 주파수 영역 1-tap 등화기 구조

다. [그림 3]는 이 과정을 도시하고 있다. 1-tap 등화를 위해 $\hat{H}_{n,k}$ 의 추정이 필요한데 LS(Least Square), LMMSE (Linear Minimum Mean Square Estimation) 등의 기법들이 사용된다 [4,7,8,9].

다. 시간 및 주파수 동기

OFDM신호는 시간 및 주파수 동기오차에 매우 민감한 성능차를 보인다[2,3,10]. Δf_i 와 Δf_f 를 실제 주파수 동기오차를 부반송파 간격으로 정규화했을 때의 정수 및 소수배 주파수 오차라고 하자. 이때 OFDM신호는 ($\Delta f = \Delta f_i + \Delta f_f$)만큼의 주파수 동기 오차를 갖게 되고 이로 인해 푸리에 변환한 신호는 다음과 같은 간섭 및 왜곡을 겪게 된다.

$$Y_{n,p} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{n,k} \left[e^{j\pi(p-k-\Delta f_f-\Delta f_i)\frac{N-1}{N}} \times \frac{\sin[\pi(p-k-\Delta f_f-\Delta f_i)]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(p-k-\Delta f_f-\Delta f_i)\right]} \right] + \hat{n}(p) \quad (6)$$

즉 Δf_i 만큼의 순환 이동이 푸리에 변환된 신호에 나타나고 Δf_f 는 인접 부반송파 간 간섭을 일으키는 요인이 된다[10].

OFDM신호에 발생한 시간동기 오차를 OFDM신호의 나이퀴스트 표본화율의 역수 (T_s/N)로 정규화한 값을 τ 라 할 때 푸리에 변환한 신호는 다음과 같은 왜곡을 겪게 된다

$$Y_{n,k} = X_{n,k} e^{j\frac{2\pi k \tau}{N}} \quad (7)$$

즉 $k\tau$ 에 비례하는 위상왜곡을 겪는다.

식 (6)와 (7)에서 볼 수 있는 왜곡 및 간섭은 OFDM신호방식의 BER성능을 매우 저하시킨다. 따라서 이에 대한 보상이 반드시 필요하다. 이미 많

은 연구를 통해 실현 가능한 많은 동기오차 추정 및 보상방법이 제시되었다[10,11,12].

라. PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) OFDM 방식의 또 다른 특징으로 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)이 높은 문제를 들 수 있다. 식 (1)의 IFFT 과정을 통해 발생된 $x_n(m)$ 은 N개의 확률변수의 합임을 알 수 있다. N이 클 경우 $x_n(m)$ 은 중심 극한 정리(Central Limit Theorem)에 의해 가우시안 확률변수의 특성을 갖게 된다. 즉 백색잡음과 같은 특성을 갖게 되어 PAPR이 커지게 되고 이는 RF증폭기의 선형구간이 매우 넓어야 함을 의미한다. 일반적으로 이러한 증폭기는 매우 고가이며, 기본적으로 높은 전력을 요구하므로 단말기에서 사용하는데 제약조건으로 작용한다[13].

이상의 OFDM신호의 특징을 정리해 보면 다음과 같다.

- 효율적인 주파수의 활용 및 간단한 구조의 채널 등화기 사용이 가능하여 수십, 수백 Mbps단위의 고
- 시간 및 주파수 동기 오차에 민감한 성능차를 보이나 이를 극복하기 위한, 실용적인 추정 및 보상방법이 이미 연구되어 있고 사용되고 있다.
- 상대적으로 높은 PAPR값을 가지며, 이를 해결하기 위한 다양한 PAPR 감소 방법들이 연구되고 있다.
- 다수개의 단일 반송파를 병렬로 전송하므로 단일반송파의 성능효율을 높이기 위해 개발된 대부분의 오류정정부호 및 신호처리 기법들을 그대로 적용할 수 있다.속 데이터 전송도 효율적으로 수행할 수 있다.

III. OFDM 방식을 적용한 시스템

이번 장에서는 현재 OFDM을 전송기법으로 사용하는 시스템들을 살펴본다. 본격적으로 OFDM을 적용한 시스템들이 나타나기 시작한 것은 유럽형 디지털 방송인 DAB(Digital Audio Broadcasting), DVB(Digital Video Broadcasting)이 등장한 1990년대부터다. 이후 IEEE 802.11a 및 ETSI HIPERLAN2 등의 무선 LAN 규격에서 OFDM이 전송 기법으로 채택되었으며, 현재 표준화 작업이 진행되고 있는 광대역 무선 접속 시스템 IEEE 802.16a 시스템에도 사용될 가능성이 높아지고 있다. 유선 분야를 살펴보면, 최근 국내에서 사용자가 폭발적으로 증가하고있는 ADSL에 적용된 DMT(Discrete Multi-Tone) 방식이 OFDM 방식으로 분류될 수 있다. 특히, 4세대 시스템이 이동 통신 뿐 아니라 다양한 이종 시스템간의 로밍을 통해 구현될 것으로 보여지기 때문에 이와 같은 시스템을 살펴보는 것은 상당한 의미가 있다고 할 수 있다. 이 외에 여러 연구에서도 OFDM 방식을 사용한 시스템들이 제안되고 있으나, 본 장에서는 크게 DAB/DVB, WLAN, ADSL에 적용된 OFDM 시스템의 구조를 살펴보기로 한다.

1. DAB 시스템

1990년대 초 활발한 공동연구를 통해 1996년 ETS 300.401이 유럽의 디지털 오디오 방송의 규격이 채택되었다[14]. 디지털 오디오 방송이 반드시 갖춰야 할 조건들 중 물리계층 즉 모뎀과 직접적으로 연관되는 특성으로 CD음질의 오디오 제공, 이동수신, 주파수의 효율적 사용 등을 들 수 있다. CD음질의 오디오 제공을 위해서 높은 데이터 전송률을 모뎀이 제공하여야 한다. 유럽형 DAB의 경우 한 신호 내에 CD음질의 5~6 오디오 채널이 수용되어야 하여 채널 코딩 후 약 1.3Mbps의 전송률을 필요로 한다. 또 이동수신을 보장하기 위해서는 반드시 다경로 페이딩에 대한 강건성이 확보되어야 한다. 주파수 사

용 효율을 높이기 위해 동일한 방송채널은 모두 동일한 주파수를 사용하는 단일 반송파 망(Single Frequency Network)의 구성이 필요하다. 기존 아날로그 방송의 경우 이의 구성이 어려워 낮은 주파수 효율을 갖는 단점이 있었다. 높은 주파수 효율을 갖고 페이딩에 대한 강건성을 갖는 OFDM 전송방식이 이러한 이유로 인해 DAB에 적용되었다. 특히 DAB는 차동 변조기법을 사용하는데 OFDM 방식의 경우 등가 병렬 백색잡음 채널 특성 때문에 차동 복조 과정이 채널을 등화하는 역할을 동시에 수행한다[4]. 따라서 채널의 추정 및 등화 과정이 필요 없어 수신기 구조가 매우 간단해지는 특징을 갖는다. 또한, 단일 반송파 망이 구성되었을 때 인접 지역으로부터의 간섭은 페이딩의 한 경로가 되므로 수신성능에 큰 영향을 주지 않게 된다. DAB에 적용된 OFDM방식의 몇 가지 계수들 및 DAB시스템의 몇 가지 규격을 [표 1]에 정리했다[14]. DAB 시스템은 이미 유럽 여러 나라에서 상용화되어 사용되고 있고 다양한 형태의 수신기들이 이미 개발된 상태이다 [14,15].

2. DVB-T

DVB-T(Terrestrial)은 유럽형 디지털 지상파 TV 방송을 위한 규격으로 1993년 DVB-T 연구 프로젝트가 유럽을 중심으로 시작되어 1997년 ETS 300.744규격이 유럽형 디지털 지상파 TV방식의 물리계층 규격으로 채택되었다[16]. 디지털 오디오 방송과 비슷하게 지상파 디지털 TV 방송이 반드시 갖추어야 할 조건들 중 물리계층 즉 모뎀과 직접적으로 연관되는 특성들로 CD음질의 오디오 제공, 페이딩에 대한 강건성, 주파수의 효율적 사용 등을 들 수 있다. 이러한 조건들을 만족 시키는 OFDM 전송 기법이 DVB-T규격에 채택되었으며, 채택 요인은 앞서 설명한 디지털 오디오 방송의 설명과 유사하게 설명될 수 있다. 다만 높은 전송률을 제공하기 위해

DVB에서는 QPSK 및 QAM과 같은 변조 방식이 사용되어 채널의 추정 및 등화를 위한 장치가 별도로 수신기에 필요하게 된다. 하지만 이 경우도 2장에서 설명한 것과 같이 다른 전송기법에 비해 간단히 구현할 수 있다. 또 TV의 특성상 이동수신이 반드시 필요한 것은 아니나 몇몇 응용의 예에서 DVB-T시스템 자체만으로 이동 중 수신이 가능함을 보여주고 있다[17]. 이것은 OFDM이 기법을 이용하여 고속의 데이터를 이동 중 수신이 가능할 수 있음을 보여 준 것이다. DVB-T에 적용된 OFDM방식의 몇 가지 계수들 및 DVB-T시스템의 몇 가지 규격을 [표 1]에 정리했다. DAB와 마찬가지로 유럽을 중심으로 다수의 상용 서비스가 존재하고 수신기들이 존재한다.

3. 무선 LAN에서의 응용

1995년에 본격적으로 등장한 AT&T의 WaveLAN은 실내 무선 LAN 시스템의 표준으로 자리잡으면서 AT&T (Lucent Technology)와 함께 Harris가 참여함으로써 IEEE 802.11 이라는 규격으로 발전하기에 이르렀다. 초기에 등장한 IEEE 802.11 규격은 DS-SS, FH-SS 방식을 사용하여 최대 2Mbps의 전송률을 갖는 시스템과 적외선을 사용하는 시스템에 대한 규격까지 포함하고 있었다. 그러나, 이들 규격중 가장 시장성이 있었던 방식은 DS-SS 방식으로서, 전송률을 증가시키기 위한 몇 가지 기술을 부가하여 최대 11 Mbps의 전송률을 얻게 되었고 이것은 IEEE 802.11b라는 규격이 되어, 현재 국내에도 보급되고 있다. 그러나, 기존의 DS-SS 규격을 유지하면서 전송률을 크게 증가시키는 데에 어려움이 있어, 기존의 전송 방식과는 다른 OFDM 기술을 사용한 무선 LAN 물리계층 규격이 만들어졌는데, 이는 IEEE 802.11a로 명명되어 24 Mbps 전송률(16 QAM, 1/2 컨벌루션 코드)을 표준으로 하고 옵션으로 최대 54Mbps의 전송률을 갖

는 물리계층을 정의하고 있다[18].

IEEE 802.11a 규격은 기존의 COFDM과 비교하면, 실내환경에서 사용되어지는 것을 고려하여 여러 정정 부호, 심볼타이밍/주파수 동기, 채널 등화기 등에서 비교적 간단한 구성을 취하고 있다. 이와 비슷한 시기에 유럽의 ETSI 내 BRAN(Broadband Radio Access Network) 기구를 중심으로 유럽형 WLAN 규격인 HIPERLAN2의 표준안이 완성되었는데, 이 시스템에서도 역시 OFDM 방식을 사용하게 되면서 OFDM 방식은 광대역 고속 전송 방식에 적용하는데 매우 유리한 시스템인 것이 입증되었다.

또한, MEDIAN, MMAC 등과 같이 전송 속도를 최대 155Mbps까지 지원하는 WATM 방식에 대해 최근 진행된 여러 연구의 경우에서도 OFDM 방식을 사용한 전송이 고려되었다.

4. DMT 시스템

1990년대 초반부터 기존의 유선 전화망을 이용하여 데이터 전송에 적합한 시스템을 개발하기 위한 노

력들이 진행되어 왔다. 그 결과, ANSI에 의해 T1E1.4/98-007R4와 T1E1.4/97-104R2a의 두 개의 표준안이 결정되었다. 이 중, T1E1.4/98-007R4에서는 OFDM이 변조 방식으로 채택되어 Downstream에서 n2.048Mbps의 전송률(최대 6Mbps)을 지원할 수 있는 시스템, 이른바 ADSL 시스템을 정의하였다[19]. ADSL 시스템은 Upstream과 Downstream을 FDM 방식으로 다른 주파수를 할당하여, Upstream과 Downstream에서 각각 비대칭적인(Asymmetric) 전송률을 제공한다. T1E1.4/97-104R2a에서는 변조 방식으로 CAP/QAM 방식이 채택되어 단일 반송파 시스템이 정의되었으나, 이에 비해 OFDM 방식을 적용한 DMT 변조 방식은 유선 모뎀의 복잡도에 큰 영향을 미치는 등화기의 구조가 간단해서 전송 속도 측면에서 유리하다. 국내에서도 이 두 가지 방식을 이용한 유선 데이터 전송 서비스가 제공되고 있다.

IV. 4세대 통신 시스템을 위한 OFDM 기술

표 1. OFDM이 적용된 시스템 규격

항목	DAB	DVB-T	무선 LAN	ADSL
반송파수	384~1536	1,705, 6,817	48 (총 64)	256
반송파 간격(KHz)	1~4	1,116, 4,464	312.5	4.3125
OFDM심볼 주기(μ s)	156~1,246	224, 896	4	250
보호구간의 길이*	1/4	1/4~1/32	1/4	1/8
대역폭(MHz)	1.536	7.61	20	1.104
사용대역	VHF~UHF	VHF~UHF	SHF(U-NII)	-
채널코딩	컨벌루션 코드 1/4~3/4	컨벌루션+RS 1/2~7/8	컨벌루션 코드 1/2~3/4	RS code
변조방식	DQPSK	QPSK, QAM	PSK (2,4), QAM (16,64)	DMT
전송률(코딩후, Mbps)	1.3	4.98~31.67	6~54	N2.048

1) 보호구간을 제외한 심볼 주기에 대한 보호구간의 비율

앞서 살펴 본 바와 같이 OFDM 방식의 높은 효율성은 그 동안 WLAN과 디지털 방송 등의 적용을 통해 입증되었으며, 현재까지도 다양한 통신에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면, 이동 통신 분야에 있어서는 아직까지 상용 시스템이 개발되지 않은 실정이나 OFDM 방식의 높은 전송 효율에 관심을 갖고 이를 이동 통신에 적용하고자 하는 논의가 활발하게 진행되고 있다. 본 장에서는 OFDM 방식의 장점을 4세대 시스템에 초점을 맞추어 살펴보고, 현재 4세대 시스템과 관련해 제안되고 있는 OFDM 방식의 기술들의 현황을 살펴본다. 또한, 최근 OFDM과 관련해 나타나고 있는 연구 주제들을 살펴본다.

1. 4세대 통신 시스템에서의 OFDM 방식의 장점

앞서 언급한 것과 같이 4세대 무선 통신 시스템은 이동 통신 뿐 아니라 기존의 고정 무선 통신망을 포함할 것으로 보여지고 있다. 기존의 고정 무선 통신 시스템의 경우 많은 시스템에서 OFDM 방식을 사용하고 있으며 앞으로도 사용할 것으로 보이는 가운데, 최근 OFDM 방식을 4세대 이동 통신 시스템에 적용하고자 하는 움직임이 많이 나타나고 있다. 이러한 움직임을 종합해보면 OFDM 방식이 앞으로 4세대 무선 통신 시스템에서 가장 중요한 변조 방식으로 자리잡게 될 것으로 보인다. 기본적으로 OFDM 방식이 4세대 통신 시스템에 유리한 이유는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 높은 주파수 효율 및 전송 용량 지원
- CDMA 시스템에 비해 간섭 요인이 상대적으로 적음
- QAM 형태의 변조 방식을 사용해도 성능 저하가 없음
- 상대적으로 긴 심볼 길이를 사용하며, 보호 구간을 사용하므로 다중경로 페이딩에 강한 특성을

가짐

- 채널 등화를 주파수 영역에서 1-tap 등화기를 사용하여 간단히 구현 가능
- 주파수 선택적 페이딩 환경에서 부반송파 별로 적응 변조 방식을 사용하는데 유리함
- 기존의 방송, WLAN 및 BWA 시스템에 이미 사용되고 있어 멀티 모드 단말기 사용 시 CDMA 또는 TDMA 구조에 비해 추가적인 구조가 상대적으로 적음

CDMA를 사용하는 단일 반송파 변조 방식을 사용하는 경우 주파수 확산에 의해 대용량의 데이터 전송이 힘들며, 동일 셀 간섭, 인접 셀 간섭, 다중 사용자 간섭 및 다중 경로 간섭 등 다양한 간섭을 제거해야 하는 문제가 심각하다. 특히, CDMA 시스템에 QAM 변조 방식을 적용하는 경우, 이전의 시스템에서는 고려하지 않았던 다중 경로 간섭(MPI : Multi-Path Interference)이 존재하여 이를 제거하기 위해 복잡한 시스템이 사용되어야 하는 문제가 제기되었다. 반면, OFDM 방식의 경우 이러한 문제가 존재하지 않으며 현재 대부분의 시스템에서 QAM 변조 방식을 적용하고 있다. 또한, CDMA 방식에서도 보다 심각해지는 전송환경의 극복을 위해 주파수 영역 등화기(FDE: Frequency Domain Equalizer)의 사용이 고려되고 있는 실정이므로 기존에 OFDM의 단점으로 여겨지던 IFFT/FFT 구조에 의한 시스템 복잡도 문제도 오히려 장점으로 부각될 수 있다. 단일 반송파 변조 방식을 사용하는 시스템의 경우에는 한 채널 당 1개의 변조 방식만을 적용할 수 있어서 적응형 변조 방식을 사용하는 경우 시간에 따른 변조 방식을 변화만을 취할 수 있었다. 기존의 협대역 시스템에서는 일반적으로 전체 전송 대역이 동일한 채널 응답을 갖기 때문에 이러한 방식을 사용해도 높은 효율을 얻을 수 있었다. 이에 반해, 4세대 통신 시스템에서는 광대역 전송을 목표로 하기 때문에 하나의 전송 대역 내에서도 다른 채널 응답을

갖는 주파수 선택적 페이딩을 겪게 되어 단일 반송파를 사용하는 시스템에서 효율적인 적응형 변조 방식을 사용하는 데 어려움이 있다. 반면, OFDM 방식의 경우 반송파별로 다른 변조 방식을 적용할 수 있어서 이러한 광대역 신호 전송 시 보다 효율적으로 적응형 변조 방식을 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 이동 통신 외에 최근 논의되고 있는 4세대 통신 시스템의 개념이 기존의 광대역 무선 접속, WLAN 및 방송 시스템과의 효율적인 연동을 목표로 하고 있기 때문에 이와 같은 기존의 시스템과의 연동에도 매우 유리할 것으로 보인다.

2. 4세대 통신 시스템에서의 OFDM 방식의 응용

앞 절에서 살펴본 다양한 장점들로 인해 OFDM 방식은 BWA 및 무선 사설망과 같은 고정 통신 시스템은 물론이고 이동 통신 시스템에 응용되어 4세대 시스템의 중요한 변조 방식으로 자리잡을 것으로 기대된다. 본 절에서는 현재 제안되거나 적용되고 있는 OFDM 방식의 시스템들의 현황을 살펴보고 전망을 진단해 본다.

가. OFDM 이동 통신 시스템

이동 OFDM 시스템 설계의 가장 중요한 요소는 셀 설계 기술과 다중 접속 기술이며, OFDM 방식의 경우 다중 사용자를 단일 주파수 네트워크로 이용하기 위해서는 시간과 주파수 영역에서 사용자를 분리하는 OFDMA 다중 접속 방식을 사용하는 것이 효율적이다. 일반적으로 OFDMA 방식은 상향링크에 적용이 힘들어 이동 통신 시스템에 적용하기 힘들었으나, 최근 OFDMA 방식의 하향 링크에서 높은 전송률을 지원하는 시스템에 관심이 집중되면서 상향 링크에 다른 방식을 적용하면서 하향 링크에 OFDMA 방식을 사용하는 구조들이 제안되고 있다.

최근 IMT-2000의 확장 개념으로 볼 수 있는 이동 통신 기술에 관한 표준화 작업이 활발히 진행되고

있으며, 이 표준안에서는 추가 대역에 순방향 고속 패킷 전송을 위한 시스템을 고려하고 있어, 기존의 시스템과 다른 시스템을 사용하는 것이 가능할 것으로 보인다. 특히, 3GPP에서는 HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)의 stand alone DSCH(Downlink Shared Channel)에 QPSK 변조를 사용한 OFDM 방식을 사용하여 5MHz 대역에서 최대 7.2Mbps의 전송률을 지원하는 방식이 제안되었다[21]. 기존의 WCDMA 방식을 사용하는 경우 5MHz 대역에서 최대 2Mbps의 전송률을 지원하는 것에 비해 제안된 OFDM 시스템은 전송 용량 측면에서 매우 큰 이득을 얻을 수 있어 관심이 모아지고 있다. 특히 이 시스템에 QPSK 외에 8PSK나 16QAM을 적용할 경우 최대 10.8~14.4Mbps까지 전송용량을 증가시킬 수 있다.

또 다른 응용 분야로 최근 DVB 연구 그룹에서 제시하고 있는 시나리오를 들 수 있는데, 앞서 살펴본 것과 같이 DVB-T 방식은 7.61MHz의 대역폭을 통해 최대 31Mbps까지의 전송률을 지원하고 있으며, Interactive mode의 경우 초고속 인터넷 서비스를 지원할 수 있다. 특히, DVB와 같은 방송 시스템은 일반적인 셀룰라 시스템에 비해 매우 넓은 지역을 서비스 할 수 있으므로 고속 이동체에서도 고속의 데이터 서비스를 받을 수 있는 장점이 있다. 이러한 연구 흐름 중 특히 GSM 시스템과의 연동을 통해 DVB-T 단말기에 GSM 수신 기능을 첨가한 단말기를 이용하여 순방향에서 고속 데이터 서비스를 지원하는 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이러한 연동은 WLAN(특히 802.11b) 등과 연동하여 더욱 더 유연한 서비스의 지원을 가능하게 할 것으로 보인다[22].

미국에서는 AT&T를 중심으로 OFDM 방식의 4세대 통신 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. AT&T에서는 상향 링크 EDGE(Enhanced Data Rate for GSM Evolution) 기술과 하향 링크 OFDM을 접목한 방식을 제안하여 4G

Access 라고 명명하고 연구를 진행중이다[23]. 일반적으로 4G에서는 순방향의 전송률이 강조되는 시스템으로 정의하고, 800kHz의 대역을 통해 고속 이동 중 최대 384kbps, 고정 접속 시 최대 10Mbps의 전송속도를 지원하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 기술은 DSP 기술의 발전을 기반으로 한 SDR(Software Defined Radio) 기술의 발전과 함께 더욱더 발전할 것으로 보인다.

나. OFDM 광대역 고정 통신 시스템

OFDM 방식을 사용하는 광대역 고정 통신망은 WLAN등과 같은 시스템에서 이미 표준으로 채택된 상태이며, 최근 표준화가 진행중인 IEEE 802.16a 및 ETSI BRAN HIPERMAN 시스템에서도 채택될 가능성이 높아지고 있다[24]. 특히 이러한 시스템에서는 고속 이동성의 지원을 고려하지 않기 때문에 10~155Mbps까지의 고속 전송을 지원할 수 있다.

앞서 언급한 것과 같이 최초의 WLAN 시스템은 2.4GHz 대역에서 DS/FH-CDMA 방식을 적용하여 10Mbps 정도의 전송률을 지원하였으나, 최근 IEEE 802.11a나 ETSI HIPERLAN2와 같이 5GHz 대역에서 OFDM 방식을 적용하여 24~54Mbps까지의 전송률을 지원하는 WLAN 시스템의 표준이 완성되었다. 이 시스템의 사용으로 인해 OFDM 방식이 다른 변조 방식에 비해 고정 대역에서 더 높은 전송 효율을 보이는 시스템이라는 것이 검증되었다. 또한, 근래에 진행된 MEDIAN, MMAC, BAHAMA 등과 같은 여러 프로젝트에서는 OFDM 방식을 사용하여 ATM 수준의 높은 전송률을 실현하였고, 이러한 결과들을 통해 이 분야에서 OFDM 방식의 사용이 점차 늘어날 것임을 시사하였다. WLAN 시스템과 달리 소규모 지역에서 비교적 낮은 전송률로 가정이나 개인 영역의 정보 기기들을 연결하는 Bluetooth, HomeRF 등과 같은 WPAN 시스템에서도 최근 OFDM 방식을 적용하고자 하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

WPAN 시스템은 현재 FH-SS 방식 등을 적용하고 있으나 여러 기관들을 통해 OFDM 방식을 사용하여 전송율을 높이고자 하는 연구가 진행중이다. 또한, 최근 여러 회의들을 통해 WLAN과 WPAN이 ANSIBLE이라는 통합 시스템으로 발전되는 시나리오가 고려되고 있음을 감안할 때 통합 시스템의 변조 방식으로 OFDM 방식이 매우 유력할 것으로 보인다. 무선 광대역 고정 통신 시스템의 큰 흐름 중의 하나인 광대역 무선 접속의 표준화 과정에서도 OFDM 방식을 사용하고자 하는 연구가 활발히 진행중이다. 특히 곧 표준이 결정될 것으로 보이는 IEEE 802.16a 시스템에서는 OFDM 방식의 표준안이 채택될 가능성이 점차 높아지면서 OFDM 방식이 광대역 고정 접속망에 전반적으로 사용될 것으로 보여지고 있다. 특히, 다양한 시스템들의 통합 측면에서 4세대 통신 단말기의 효율성을 고려한다면 각 시스템에서 동일한 방식의 물리 계층 구조를 갖는 것은 여러가지 면에서 유리하게 작용하며, 이 경우 OFDM이 가장 가능성 있는 구조가 될 것으로 보인다.

3. 4세대 이동 통신 시스템에의 적용을 위한 OFDM 연구 분야

이와 같은 흐름에 따라 앞서 살펴 본 OFDM 방식의 장점을 극대화 하기 위해 다양한 연구 주제들이 등장하고 있다. OFDM 방식을 4세대 통신 시스템에 적용하기 위한 연구 분야는 크게 변복조 방식 및 기저대역 신호 처리 기법과 단일 주파수 셀룰라 네트워크를 이용한 다중 접속 방식 및 기타 분야의 3가지로 나눌 수 있다. OFDM 방식의 경우 변복조 방식의 경우 이미 많은 부분 연구가 진행되었으나, 현재 셀룰라 환경에서 사용되는 시스템이 없으므로 셀룰라 환경에서 발생하는 여러가지 문제에 대한 연구가 미비한 실정이다. 본 절에서는 이 3가지 분야를 중심으로 4세대 통신 시스템에 적용하기 위한 OFDM 방식의 연구 분야에 대해 살펴본다.

가. 변복조/기저 대역 신호 처리 분야

현재 기저대역 신호처리 분야에서 가장 중요한 연구 주제는 주파수 및 시간 동기 오차 추정 알고리즘 개발과 PAPR 감소 방안에 대한 연구를 들 수 있다. 앞서 살펴 본 바와 같이 OFDM 시스템은 IFFT를 사용하기 때문에 주파수 및 시간 동기 오차에 매우 민감한 특성을 보인다. 현재 이 부분에 대해서는 많은 연구가 진행되어 다양한 방식의 동기 알고리즘이 제안되어 사용되고 있는 실정이다. 앞서 언급한 바와 같이 OFDM은 PAPR이 커서 선형 증폭기 사용에 문제가 발생하므로 이를 감소시키기 위해 많은 연구가 필요하다. 또한, PAPR 문제는 이동 시스템의 상향 링크 전송 시에 단말기에 과다한 전력을 요구하므로 OFDM 방식의 상향링크 구성의 어려움의 원인이 되고 있어 4세대 통신 시스템에의 응용을 위해 PAPR을 줄이는 연구는 매우 중요하다. 이와 함께, 최근 적응형 변조 방식의 필요성이 대두되면서 OFDM 방식에 적응형 변조 방식을 적용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 앞서 언급한 바와 같이 OFDM의 병렬 전송의 특성에 따라 부반송파별로 다른 변조 방식을 적용할 수 있는 적응 변조 방식에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 이 방식은 OFDM 방식의 일종인 DMT에서 Bit-loading이라는 방식을 사용해 이미 구현되고 있으며, 빠르게 변화하는 무선 채널 환경에 적응하기 위해 보다 효율적인 방식에 대한 연구가 요구된다.

나. 셀룰라 시스템에서의 다중 접속 방식

OFDM을 다중 사용자 환경에서 이용할 경우 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식의 다중 접속을 사용하는 것이 전송 효율 측면에서 매우 유리하다. OFDMA 방식에는 몇 가지 방식들이 제안되고 있으나, SONY에서 제안된 BDMA(Band Division Multiple Access) 방식이 구현의 편의성으로 인해 활발히 연구되고 있다[20]. [그림 4]는 BDMA 방

식을 시간과 주파수 측면에서 개념적으로 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 BDMA 방식에서는 주파수 축에서 부반송파를 몇 개의 블록으로 나누고 시간 축에서 심볼 단위로 나누어 만들어지는 MCB(Multi-Carrier Block)를 다양한 방식으로 사용자에게 할당하는 방식이다. MCB의 조합은 사용자가 요구하는 QoS에 따라 다양하게 이루어질 수 있다. 순간적으로 많은 양의 데이터를 요구하는 사용자(사용자1)에게는 주파수 축에서 많은 수의 MCB를 할당한다. 음성이나 동영상과 같이 시간 지연에 민감한 데이터를 요구하는 사용자(사용자2)에게는 동일 주파수 대역에서 오랜 시간 동안 MCB를 할당한다. 또한, 주식 정보와 같은 단순한 정보를 요구하는 사용자(사용자3)에게는 몇 개의 MCB를 지원을 배분할 수 있다. 이러한 방식을 사용하는 경우 부반송파의 개수가 많을수록 효율이 높다. 이와 같은 방식을 적용하여 OFDMA 시스템은 일반적으로 ATM에서 사용되던 확률적 다중화(Statistical Multiplexing) 기법을 지원하여, 여러 사용자에게 효율적인 자원 분배를 가능하게 하는 장점이 있다. 또한, 각 부반송파 블록별로 다른 변조 방식을 사용할 수 있어 주파수 선택적 페이딩 환경에서 채널 상태에 맞추어 전송이 가능해 최대의 전송 용량을 지원할 수 있는 장점이 있다. 반면, OFDMA 방식은 도플러 주파수와 전송 지연이 다른 사용자들의 신호를 동시에 처리해야 하는 문제 때문에 상향 링크에 적용하기 힘든 문제를 안고 있으며, 셀룰라 환경에서 주파수 재사용 효율이 CDMA 방식에 비해 떨어지는 문제가 있다. 이러한 문제는 4세대 시스템의 경우 상/하향 링크간 비대칭 특성을 이용해 해결할 수 있는데, 고속 전송을 요구하는 하향 링크에는 OFDMA 방식을 사용하고 상대적으로 전송률이 낮은 상향 링크에는 CDMA 또는 TDMA 방식을 사용하는 방식이 그것이다. 상향 링크에 사용할 수 있는 방식으로 는 여러가지 방식이 고려될 수 있으며, 802.16a의 OFDM 방식의 제안서에는 OFDM-TDMA 방식

의 사용이 제안되었다. 반면, OFDM-TDMA 방식을 사용할 경우 시간 슬롯을 상대적으로 긴 OFDM 심볼 단위로 할당해야 하므로 사용자에 효율적인 자원 할당이 어렵다. 또한, 각 사용자마다 추가적인 프리앰블을 사용해야 하는 문제가 있어 전송 효율이 감소하는 문제가 있다. 고정 통신 시스템의 경우는 채널 환경의 변화가 심하지 않으므로 이러한 문제가 심각하지 않으나, 셀룰라 시스템과 같이 이동 환경을 지원하려고 하는 시스템에서는 적용하기 힘들다. 이러한 경우 상향 링크에 OFDM 방식을 사용하기 보다는 기존의 CDMA 또는 TDMA 방식을 사용하는 것이 효율적일 것으로 보인다. 이와 함께 앞서 언급한 것과 같이 다중 사용자들의 신호가 서로 다른 경로와 페이딩을 겪는 통신 환경에서 전송 효율의 극대화를 위해 적응형 변복조 방식과 결합한 자원 할당 기법에 대해 많은 연구가 필요하며, 계층형 셀 구조를 적용하여 고속 이동 접속 사용자와 고정 접속 사용자간에 간섭 없이 효율적으로 통신을 가능하게 하는 기술에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

OFDM 방식은 여러 개의 단일 반송파 전송 방식을 선형적으로 결합한 방식으로 볼 수 있기 때문에 기존에 나와있는 시공간 코드 기법을 그대로 적용할 수 있다. 반면, BLAST(Bell-lab Layered Space-Time)과 같은 시스템 적용 시 동시에 디코딩 해야 하는 데이터의 수가 부반송파 개수만큼 증가하는 문제가 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 또한, 다중 안테나에 의해서 발생하는 전송 경로간 간섭을 줄이기 위한 연구가 필요하다. 스마트 안테나는 수신기에서 간섭 신호를 제거하고 송신기에서 특정 사용자에게 전력을 집중 시켜 간섭을 제거하는 시스템으로 3세대 이후의 시스템에서 그 활용 용도가 넓어지고 있다. 특히, ISM 대역에서 사용할 경우 제한된 전력으로 원하는 성능을 얻기 위해 그 중요성이 커지고 있다. 이 외에도 다양한 시스템에서의 표준 채널 모델링 및 효율적인 구현 방식을 위한 여러 가지 연구가 추가적으로 요구된다. [표 2]에 최근 논의가 진행 중이거나 일반적으로 OFDM 방식의 문제점으로 여겨지는 연구 분야가 정리되어있다.

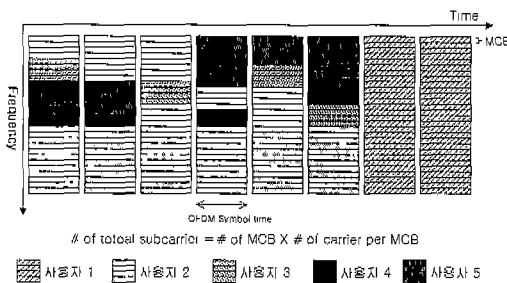


그림 4. OFDMA 방식의 자원 할당 방식

다. 기타 연구 분야

앞서 언급한 두 분야 외에 4세대 통신 시스템에서 공통적으로 연구가 진행되고 있는 연구 주제로는 크게 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)-OFDM과 스마트 안테나 시스템이 있다. MIMO-OFDM은 다수의 송수신 안테나를 사용하여 통신하는 구조로 Vector-OFDM이라고도 한다.

V. 결론

최근 국내외적으로 4세대 이동 통신에 대한 관심이 높아지면서, 4세대 시스템의 요구사항을 만족시키는 시스템에 대한 연구가 세계 유수의 기관에서 진행되고 있다. 특히, OFDM 방식이 높은 전송 효율과 간단한 채널 등화 방식을 지원하는 등의 4세대 이동 통신 시스템에 적용하기에 적합한 방식으로 알려지면서 관심이 높아지고 있다. 본 논문에서는 OFDM 방식의 기본 원리와 적용 시스템을 살펴보고 4세대 이동 통신 시스템에 OFDM 방식을 적용하기 위한 필요한 여러 기술들을 살펴보았다. 이상과 같이 살펴본 OFDM 방식은 높은 전송 효율, 유연한 자원 할당 능력 및 간단한 채널 등화 구조 등 다양한 장점으로 인해 4세대 통신 시스템에 적용하는데 매우 유리

표 2. 4세대 시스템을 위한 OFDM 연구 분야

연구 분야	연구 주제
Modulation/ Signal Processing	PAPR reduction Frequency/Timing Synchronization Frequency Domain Channel Estimation Adaptive Modulation and Coding
Multiple Access/ Cell Planning	Uplink problem by different frequency offset and time delay of each user Efficient Resource Allocation Algorithm Seamless Hand-off Layered Cell Structure
Etc	MIMO-OFDM Techniques Smart Antenna Indoor/Outdoor Channel Modeling System Roaming between Different Systems Low Complexity FFT module SDR Techniques

한 시스템으로 보인다. 4세대 무선 통신 시스템은 음성보다는 데이터 위주의 서비스로 변화할 것으로 보이므로 하향 링크에 높은 전송률을 지원하는 것이 매우 중요하다. 최근 하향 링크에 OFDM 방식을 사용하면서 상대적으로 전송률이 적은 상향 링크에 기존의 방식을 사용하는 형태의 비대칭 변조 시스템에 대한 연구가 여러 기관을 통해 이루어지고 있다. 앞서 살펴 본 OFDM 방식의 장점을 살리면서 효율적으로 4세대 이동 통신 시스템에 적용하기 위해서는 현재 그 연구가 취약한 셀룰라 구조와 OFDMA 방식에 대한 활발한 연구가 필요할 것으로 보인다. 결론적으로 차세대 시스템에서의 국가 경쟁력 강화를 위해 기존의 CDMA 시스템과 함께 OFDM 시스템에 대한 정부 주도하에 산학연이 협동하는 국가 차원의 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

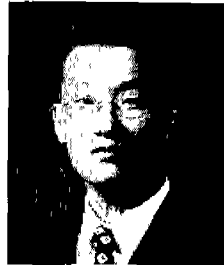
※참고문헌

- (1) ITU-R WP8F, Working document towards DRAFT report - Vision and objectives for the ongoing enhancement of IMT-2000 and future systems beyond IMT-2000 Document 8F/TEMP/25-E, 23 August 2000
- (2) Robert W. Chang, "Synthesis of Band-Limited Orthogonal Signals for Multi-channel Data Transmission," Bell Syst. Tech. J., vol. 45, pp. 1775-1796, Dec. 1966.
- (3) B. R. Saltzberg, "Performance of an efficient data transmission system," IEEE Trans. Commun. Technol., vol. COM-15, pp. 805-813, Dec. 1967.
- (4) S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency division multiplexing using discrete Fourier transform," IEEE Trans. Commun. Technol., vol. COM-19, pp. 628-634, Oct. 1971.
- (1) ITU-R WP8F, Working document to-

- [5] A. Peled and A. Ruiz, "Frequency Domain Data Transmission using Reduced Computational Complexity algorithms," ICASP80, pp. 964-967. 1980.
- [6] R. V. Nee and R. Prasad, "OFDM For Wireless Multimedia Communications," Artech House Publishers. 2000.
- [7] Won Gi Jeon, et. al, "An Equalization Technique for Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems in Time-Variant Multipath Channels." IEEE Tran. on Comm., vol 47., No. 1, pp. 27-32, Jan. 1999.
- [8] M. Sendell, "A COMPARATIVE STUDY OF PILOT BASED CHANNEL ESTIMATORS FOR WIRELESS OFDM," Tech. Report, Rulea Univ. 1996.
- [9] Ye Li, et al., Robust Channel Estimation for OFDM Systems with Rapid Dispersive Fading Channels, IEEE Trans. On Commun., Vol. 46, No. 7, July 1998, pp. 902~915.
- [10] P. Moose, "A technique for orthogonal frequency-division multiplexing frequency offset correction," IEEE Trans. on Commun., Vol.42, No.10, pp.2908-2914, Oct. 1994.
- [11] J.-J. van de Beek, M. Sandell and P. O. Borjesson, "ML estimation of timing and frequency offset in multi-carrier systems," Research Report TULEA 1996:09, Division of Signal Processing, Lulea University of Technology. 1996.
- [12] K. J. Bang, N. S. Cho, J. H. Cho, K. C. Kim, H. C. Park, D. S. Hong A Coarse Frequency Offset Estimation in an OFDM System Using the Concept of the Coherence Phase Bandwidth, ICC2000, pp. 1135~1139, New Orleans, June 2000.
- [13] Myonghee Park, et. al, "PAPR Reduction in OFDM Transmission Using Hadamard Transform," ICC2000, pp. 430-433, 2000.
- [14] ETS 300 401, Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting to mobile portable and fixed receivers, 2nd Ed., ETSI, May 1997
- [15] 조재희 외, Synchronization Algorithms and Implementation of PC Based Receiver of Eureka-147 Digital Audio Broadcasting, 한국통신학회논문지 vol.25 No.10A, 2000 10, pp. 1499-1511.
- [16] ETS 300.744, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital Terrestrial television(DVT-T), ETSI, March 1997.
- [17] Loh Cheng Song, Mobile DVB-T in Singapore, (<http://www.dvb.org>)
- [18] IEEE 802.11a, Supplement to Standard for Telecommunications and Information Exchange between Systems LAN/MAN Specific Requirement Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specification: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band, 1999.
- [19] ANSI/T1E1.4/94-007, Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)

Metallic Interface.

- [20] ETSI STC SMG2#23, OFDMA Evaluation Report, 1997
- [21] 3GPP TSGR1-01-0391, OFDM as a candidate for stand-alone DSCH
- [22] Nokia, Interactivity with GSM in a Portable Terminal, (<http://www.dvb.org/resources/powerpoint/lipsanen.ppt>)
- [23] <http://www.eetimes.com/story/OEG20000915S0034>
- [24] IEEE 802.16.3c-01/33r2, OFDM proposal for the IEEE 802.16a PHY draft standard
- [25] 조재희, 조남신, 방극준, 전희영, 박명희, 박현철, 홍대식, "유럽형 디지털 라디오 수신기의 동기 알고리즘 및 실시간 구현", 한국통신학회논문지, 제25호, 10A호, pp. 1499~1511, 2000년 10월.
- [26] K.J Bang, N.S Cho, J.H Cho, H.Y Jun, K.C Kim, H.C Park, Daesik Hong, "A Coarse Frequency Offset Estimation in an OFDM System Using The Concept of the Coherence Phase Bandwidth", IEEE Trans. on Comm. (계재 예정)



육 영 수

1996년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 관심분야 : MIMO 시스템, OFDM 시스템, 터보 코드



조 남 신

1995년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 관심분야 : OFDM 시스템, 이동통신 시스템, 통신 신호 처리



조재희

1994년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년~1998년 SK 텔레콤 중앙연구소 (주임연구원)
1998년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
관심분야 : OFDM 시스템, 통신 신호처리



홍대식

1983년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 Electrical Eng. Purdue University (Ph.D)
1991년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 교수
관심분야 : 차세대 통신 시스템, 이동 통신, 통신 신호처리, 비선형 신호처리, 기록 및 저장매체



천현수

1996년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
관심분야 : WLAN, OFDM 시스템, MIMO 시스템