Beyond IMT-2000 시스템을 위한 OFDM 무선 전송 기술

An OFDM Wireless Transmission Technique for Systems Beyond IMT-2000

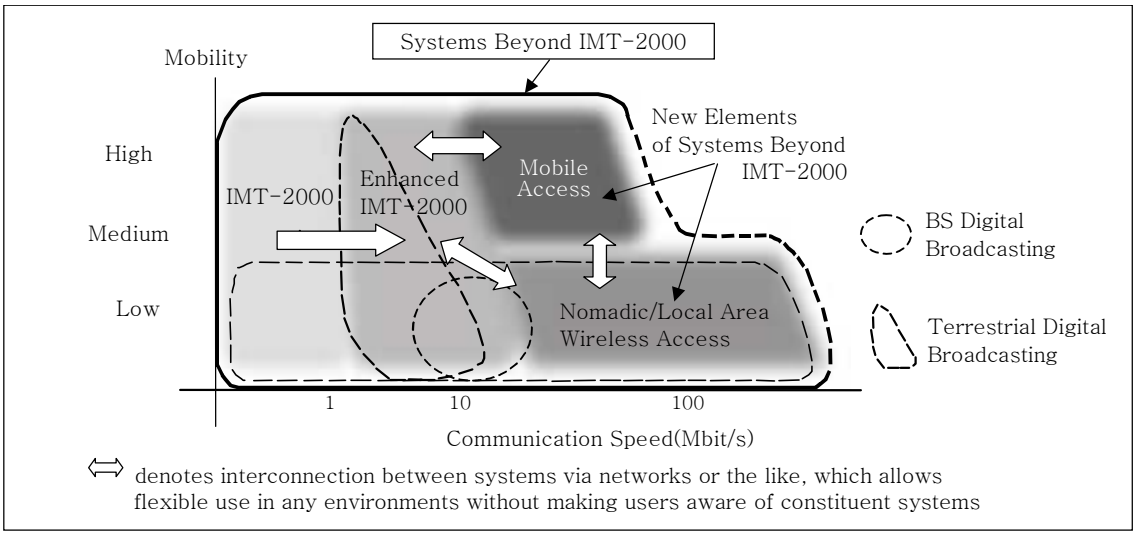
조용수(Y.S. Cho) 단말기모뎀연구팀 초빙연구원, 중앙대학교 전자전기공학부 교수
장경희(K.H. Chang) 단말기모뎀연구팀 선임연구원, 팀장

본 고에서는 Beyond IMT-2000 시스템에서 Mobile Access의 무선 전송 기법으로 OFDM 방식의 적용 가능성에 대하여 살펴본다. 현재 사용되는 CDMA 방식은 고속 전송 시 chip rate가 크게 증가하기 때문에, Beyond IMT-2000 시스템의 Mobile Access에서 요구하는 2～100Mbps의 고속 데이터 전송률을 만족시키기가 용이하지 않다. 반면, OFDM 방식은 주파수 효율이 높고, 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있으며, FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 고속 데이터 전송 시 적합하다. 본 고에서는 OFDM 방식을 사용한 기존의 통신 시스템의 특징을 살펴본 후, Beyond IMT-2000 시스템 Mobile Access의 전송방식으로 OFDM을 적용할 경우의 기술적인 고려사항과 모의실험 결과에 대하여 서술한다.

I. 서 론

3세대 이동통신 시스템인 IMT-2000 시스템은 단일 표준 하의 글로벌 로밍, 2Mbps 데이터 전송, 이동멀티미디어 및 고품질 서비스 제공의 목적으로 시작되었으나, 단일 표준안 도출에 실패하여 유럽과 일본 중심이 주도하는 3GPP와 미국이 주도하는 3GPP2로 양분되었다. 3GPP에서는 GSM을 기반으로 하는 비동기 방식의 WCDMA 시스템의 표준을 개발하고 있으며, 3GPP2에서는 IS-95 동기 방식으로부터 진화한 cdma2000 시스템의 표준을 개발하고 있다. 그러나, 이러한 표준으로는 당초 IMT-2000 시스템에서 제공하고자 한 2Mbps 서비스의 제공이 사실상 어려워 이를 보완하기 위한 별도의 표준화 작업이 논의되고 있다. 특히, 향후의 이동 멀티미디어 서비스에서 요구되는 트래픽은 하향링크가 상향링크에 비하여 높은 전송속도가 요구될 것으로 예상되기 때문에 비대칭형 서비스를 지원하는 시스템에 대한 표준화 규격작업이 이루어지고 있다.

이를 위하여 비동기 진영의 3GPP에서는 기존의 패킷전송 채널인 DSCH(Downlink Shared Channel)를 개량하여 패킷 데이터를 보다 효율적으로 전송할 수 있는 HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)의 표준화 활동을 2002년 3월 완성을 목표로 진행중에 있다. HSDPA 기술은 기존의 DSCH에 AMC(Adaptive Modulation and Coding), H-ARQ(Hybrid Automatic Repeat reQuest), FCS(Fast Cell Selection), MIMO(Multiple Input Multiple Output), Stand-Alone DSCH 등의 기술을 적용하여 10Mbps 급의 데이터 전송률을 지원하도록 되어 있다. 동기진영의 3GPP2에서는 cdma 2000 1x를 개량하여 1x EV DO(EVolution Data Only)의 규격작



(그림 1) Beyond IMT-2000 시스템에서의 Communication Speed vs. Mobility

업을 완성하였다. HDR(High Data Rate)로 알려진 1x EV DO는 하향링크로 최대 2.4Mbps의 데이터를 전송하지만 음성은 지원하지 않고, cmda2000 1x에 backward compatibility를 제공할 수 없다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 3GPP2에서는 데이터와 함께 음성을 지원하는 1x EV DV(Data and Voice)에 대한 표준화 작업을 진행중이다. 3GPP2의 1x EV DV에서도 3GPP HSDPA에서와 유사한 성능향상을 위하여 새롭게 적용한 AMC, H-ARQ, FCS, MIMO 등의 기술과 LAS(Large Area aSynchronization) 기술을 적용하였으며, 최대 5.184Mbps의 전송률을 지원한다.

ITU-R WP8F는 이러한 IMT-2000의 기능강화를 위하여 IMT-2000 Enhancement 시스템과 Beyond IMT-2000 시스템에 대한 논의를 진행하고 있으며, 2000년 3월 결성되어 현재까지 6차례의 회의를 하였고 2002년 6월까지 제안서 완성을 목표로 현재 활발한 활동중에 있다[1],[2]. (그림 1)은 2001년 10월에 일본에서 열린 6차 회의에서 협의된 Beyond IMT-2000 시스템 관련 Communication Speed vs. Mobility의 내용을 보여 준다. 현재까지 발표된 많은 문헌에서 Beyond IMT-2000 시스템을 고속 이동중에 고속 데이터 전송이 가능한 시스템으로 국한하여 표기한 것과는 달리, 이 그림에서는 Beyond IMT-2000 시스템 내에 IMT-2000, Enhanced IMT-2000, Nomadic/Local Area Wireless Access 시스템이 모두 포함되어 있다. 물론, Beyond IMT-2000 시스템 핵심기술은 이 그림에서 Mobile Access라고 정의된 옥외에서 고속 이동중의 고속 데이터 전송 기술과 Nomadic/Local Area Wireless Access라고 정의된 옥내・외에서 저속 이동중 초고속 데이터 전송이 가능한 무선 LAN 및 BWA(Broadband Wireless Access) 기술로 구성되어 있다.

WP8F에 기술된 Beyond IMT-2000 시스템의 요구사항을 요약하면 다음과 같다.

- 고속 데이터 전송, 속도에 따른 가변 전송률 (100Mbps@3km/h, 20Mbps@60km/h, 2Mbps@250km/h, xMbps@500km/h)
- IP 기반의 무선 접속, QoS 지원
- 이종 시스템(IMT-2000, 무선 LAN, BWA, 위성, 방송) 간의 seamless 서비스 지원에 의한 글로벌 로밍 지원
- 다중 모드 지원, 대칭/비대칭 서비스 지원

본 고에서는 Beyond IMT-2000 시스템의 핵심

인 Mobile Access에서의 고속 데이터 전송을 위한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 고려한다. 현재 IMT-2000 시스템에서 사용되는 DS-CDMA 방식은 Rake 수신기를 사용하여 채널의 경로 다이버시티를 이용할 수 있고 소프트 핸드오버 등의 장점이 있으나, 이 방식은 고속 전송 시 칩간 간섭이 증가함에 따라 하드웨어 복잡도가 급격히 증가하고 다중사용자 간섭에 의하여 수용 가능한 사용자의 용량에 제한을 받는 것으로 알려져 있다. 이에 반하여, OFDM 방식은 무선채널에서 고속으로 데이터 전송을 하고자 할 경우 다중경로에 의해 발생하는 심각한 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있는 장점이 있어, 최근 다양한 고속 무선 통신시스템의 전송방식으로 채택되고 있다. 본 고에서는 Beyond IMT-2000 시스템의 Mobile Access에 OFDM 방식의 적용 가능성을 진단하기 위하여 OFDM의 개요와 OFDM 방식을 사용한 기존의 통신 시스템을 살펴본 후, OFDM 기반의 Mobile Access 실현을 위한 요소 기술에 대하여 언급한다.

II. OFDM 개요

1. OFDM

OFDM 방식은 여러 개의 반송파를 사용하는 다수반송파 전송의 일종으로 반송파의 수만큼 각 채널에서의 전송주기가 증가하게 된다[3],[4]. 이 경우, 광대역 전송 시에 나타나는 주파수 선택적 채널이 심볼간 간섭이 없는 주파수 비선택적 채널로 근사화 되기 때문에 간단한 단일탭 등화기로 보상이 가능하다. 이와 같은 OFDM 신호의 등가 이산시간 기저대역 신호는 송신단에서는 IDFT, 수신단에서는 DFT를 수행한 결과와 같은 결과가 되어 IFFT와 FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있다. (그림 2)와 (그림 3)은 OFDM 방식의 개요와 블록도를 보여준다.

OFDM 시스템이 주파수 간격 Δ_F 를 갖는 N 개 부반송파로 이루어져 있다고 가정할 경우, 전체 대역폭은 $W = N\Delta_F$, 시간영역에서의 유효 심볼길이는 $T_f = 1/\Delta_F$ 로 된다. 이때, k 번째 부반송파에 실리는 주파수 영역 값을 X_k 라 하면, 송신단에서의 시간영역 OFDM 심볼은 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi \frac{k}{T_f} t} \qquad (1)$$

이 경우, 수신단에서의 기저대역 신호 $y(t)$ 는 (2)와 같이 주어진다.

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k X_k e^{j2\pi(\Delta_F k + \Delta_f)t} \qquad (2)$$

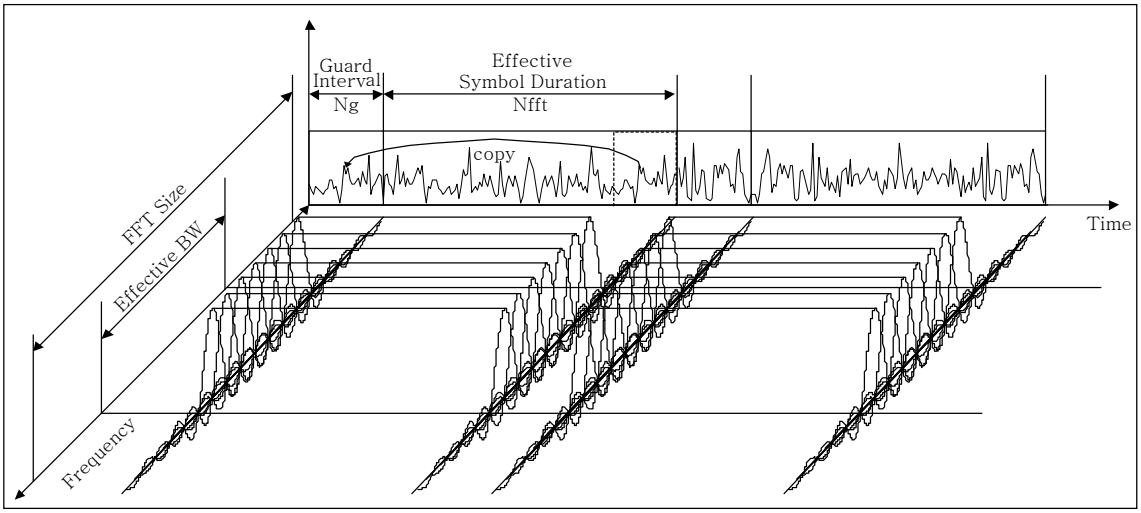
여기서, H_k 는 k 번째 부반송파에서 무선채널의 전달함수이며, Δ_f 는 주파수 옵셋을 나타낸다. ADC를 통하여 표본화된 수신 심볼의 m 번째 샘플은 (3)과 같이 주어진다.

$$y_m = y(t)\Big|_{t\,=\,(m\,+\,\delta)T_s} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k X_k e^{j2\pi \frac{(m+\delta)(k+\varepsilon)}{N}} \qquad (3)$$

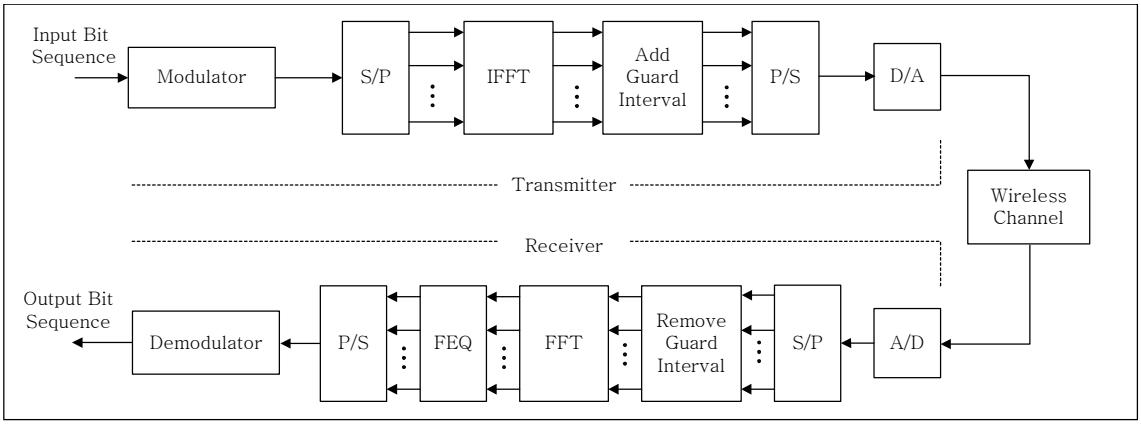
여기서, δ 는 표본화 주기 $T_s = 1/(N\Delta_F)$ 에 대하여 정규화된 타이밍 옵셋 값을 나타내고, ε 은 Δ_f/Δ_F 로 부반송파 대역폭에 대하여 정규화된 주파수 옵셋 값을 나타낸다.

2. Cyclic Prefix

OFDM 심볼의 전송은 심볼단위로 이루어지나, OFDM 심볼이 다중경로 채널을 통해 전송되는 동안 이전 심볼에 의한 영향을 받게 된다. 이러한 OFDM 심볼간 간섭을 방지하기 위해 연속된 심볼 사이에 채널의 최대지연확산보다 긴 보호 구간(guard interval)을 삽입한다. OFDM 심볼주기는 실제 데이터가 전송되는 유효심볼주기와 보호구간의 합이 되며, 보호구간에는 부반송파의 지연에 의해 발생할 수 있는 직교성의 파괴를 방지하기 위해 유효심볼구간에서 마지막 구간의 신호를 복사하여 삽입하고, 이를 Cyclic Prefix(CP)라 한다.



(그림 2) OFDM 방식의 개요



(그림 3) OFDM 방식의 블록도

3. 인접채널간 간섭

OFDM 방식의 주파수 스펙트럼은 각 부반송파가 갖는 sync 함수의 합으로 나타나기 때문에 인접 부반송파의 간격이 유효심볼주기 역수의 정수배가 되면 직교성이 유지되지만, sync 파형은 roll-off 특성이 좋지 못하여 인접 채널에 영향을 주는 인접채널간 간섭(adjacent channel interference)을 발생시킨다. 인접채널간 간섭을 감소시키기 위해서는 대역제한 필터를 사용하여 대역 밖의 스펙트럼을 제거시키거나, 시간영역에서 raised cosine과 같은 윈도를 사용하여 대역 밖 스펙트럼의 크기를 감소시킨다. 이외에도 전송대역의 양쪽 끝 부분의 부채널을 사용하지 않는 가상 반송파(virtual carrier) 방식을 사용할 수 있다.

4. 채널추정 기법 및 등화

Coherent 방식의 OFDM에서는 채널의 왜곡을 보상하기 위하여 등화를 수행하여야 한다. OFDM 방식에서는 각 부채널이 주파수 비선택적 페이딩 채널로 근사화 되므로 각 부채널에서의 등화기는 단일 탭 형태가 되며, 이 때 채널 추정은 LS 또는 MMSE 채널 추정기를 사용한다. OFDM 방식에서의 채널추정은 채널추정에 사용하는 데이터의 종류에 따라 크게 파일럿 심볼 기반(Pilot-Symbol-Aided: PSA) 채

널추정기법과 결정지향(Decision-Directed: DD) 채널추정기법으로 구분할 수 있다. PSA 기법은 고속 페이딩 채널에 적합하며, 이 때 파일럿은 채널의 coherence 대역폭, coherence 시간, 파일럿 톤의 사용에 따른 대역폭 효율 감소 등을 고려하여 배치한다. DD 기법은 검출 데이터를 이용하여 다음 심볼 주기의 채널을 추정하므로, 고정 또는 시간 상관성이 큰 저속 페이딩 채널에 적합하다.

5. Coded OFDM(COFDM)

OFDM 방식을 사용함으로써 다중경로 채널에 의한 심볼간 간섭을 극복할 수 있으나, 특정 부채널의 감쇄가 심한 경우에는 수신 SNR이 낮아 그 부채널로 전송된 데이터의 오류확률이 증가하게 된다. 이러한 성능 저하를 방지하기 위해서 OFDM 방식에서는 전방오류정정(forward error correction) 부호를 함께 사용하여 다중경로 채널의 페이딩 현상을 극복한다. 오류정정 부호로는 Reed-Solomon 부호와 같은 블록 부호(block code)와 컨볼루셔널 부호(convolutional code)가 주로 사용되며, 대역폭 효율을 향상시킨 트렐리스 부호(trellis code), 두 개의 서로 다른 부호를 결합하여 사용하는 concatenated 부호, 터보 부호(turbo code) 등을 사용할 수 있다. 또한, 연집오류(burst error) 발생에 의한 오류 정정 성능의 저하를 방지하기 위해 인터리빙(interleaving)을 함께 사용하며, 인터리빙의 종류와 크기는 사용하는 오류정정 부호와 채널의 주파수와 시간의 페이딩 정도, 그리고 인터리빙에 따른 지연을 모두 고려해서 결정한다.

6. 다중 액세스(Multiple Access)

방송용이 아닌 셀룰러 이동통신, 무선 ATM, 무선 LAN 등에 OFDM 전송방식을 사용하는 경우에는 단일 반송파 전송방식과 마찬가지로 다수의 사용자를 위한 다중 액세스 방식이 필요하다. 대표적 방식으로는 OFDM-TDMA, OFDM-FDMA(OFDMA), OFDM-CDMA가 있다. OFDM-TDMA의 경우에는 N개의 부채널로 구성된 전체 대역을 각 사용자가 할당된 시간동안 N개의 부채널을 모두 사용한다. OFDMA는 시간에 제한 받지 않고 전체 부채널을 사용자가 요구하는 트래픽에 따라 동적으로 할당한다. OFDM-CDMA는 각 사용자가 고유의 확산부호를 사용하여 모든 시간과 부채널을 이용하는데 확산방식에 따라 MC-CDMA, MC-DS-CDMA, MT-CDMA로 구분할 수 있다. DS-CDMA는 송신데이터를 확산부호를 사용하여 시간영역에서 확산시키는 방식이나, MC-CDMA는 송신데이터를 모든 부채널에 복사한 후, 확산부호를 사용하여 주파수영역에서 확산시키는 방식으로 볼 수 있다. 따라서, DS-CDMA 방식은 시간영역에서 다중경로에 의하여 수신되는 신호의 일부만을 Rake 수신기를 사용하여 결합하는 반면, MC-CDMA 방식은 주파수영역에 분포되어 있는 모든 수신 에너지를 결합하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나, MC-CDMA 신호 스펙트럼의 대역폭은 DS-CDMA 신호 스펙트럼의 대역폭과 거의 동일하기 때문에 대역폭 효율 면에서는 이득이 없다. MT-CDMA 방식은 직/병렬 변환된 데이터를 확산부호를 사용하여 시간영역에서 확산시키는 방식이며, 이 방식에서는 각 부채널마다 시간영역으로의 확산이 이루어지므로, 확산 전 각 부채널의 스펙트럼은 직교성이 유지되나, 확산 후 부채널의 스펙트럼은 직교성을 만족시키지 못한다. 이와 같이 MT-CDMA 방식은 부채널간 조밀한 스펙트럼 오버랩을 갖기 때문에 대역폭 효율은 MC-CDMA에 비해 높으나, 부채널간 간섭 등의 영향으로 성능이 크게 열화되는 단점이 있다.

7. OFDM 방식의 고려사항

OFDM 방식은 다수의 직교 반송파를 사용하기 때문에 부반송파 사이의 직교성이 파괴되는 경우에는 채널간 간섭이 발생되어 비트에러율이 크게 저하되는데, OFDM 방식에서 직교성이 파괴되는 원인은 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다. 첫번째는 수신단에서 심볼 동기와 반송파 주파수 동기가 이루어지지 않은 경우이다. OFDM 시스템에서의 변·복조는 IFFT와 FFT의 블록단위로 각각 이루어지기

때문에 심볼 동기는 OFDM 심볼의 시작점을 찾는 것을 의미한다. 반송파 주파수 옵셋이 발생하는 경우에는 부반송파의 직교성이 파괴되어 다른 모든 부반송파의 영향을 받게 되므로, 단일 반송파 방식에 비해 심각한 성능 저하를 초래한다. 이러한 OFDM 신호의 동기화를 위하여 응용분야에 따라 주파수영역에서 파일럿 톤 또는 반복심볼을 이용하는 방식이나, 시간영역에서 CP 또는 훈련심볼을 이용하는 방식 등이 사용되고 있다. 두번째로 OFDM 방식에서 변조가 된 신호의 크기는 레일레이 분포를 가지므로 OFDM 심볼의 시간 영역 신호의 PAR(Peak-to-Average Ratio)이 단일반송파 방식의 경우에서 보다 크게 나타난다. 따라서, 고출력 증폭기를 단일반송파 방식과 동일한 효율로 사용할 경우 비선형 왜곡에 의한 채널간 간섭 및 인접채널간 간섭이 OFDM 방식에서 보다 크게 발생하게 된다. 이러한 PAR에 의한 비선형 왜곡 감쇄를 위하여 부호화 기법, 사전왜곡 기법 등이 사용된다. 세번째는 채널의 특성이 송・수신기의 상대적 이동으로 인해 OFDM 심볼주기 내에서 변하는 경우이며, 이 때 수신단에서 각 부반송파의 직교성이 파괴되어 채널간 간섭이 발생하게 된다. 특히 본 고에서 다루고 있는 Mobile Access에서 고속의 이동 시 채널간 간섭이 급격히 증가하며, 이 경우에는 단일탭 등화기로 보상이 어렵기 때문에 시스템의 성능 저하가 발생된다. 이의 보상을 위해서는 이동성에 따른 채널간 간섭의 양을 추정하여 주파수영역에서 이를 보상하는 기법 등이 사용될 수 있다.

III. OFDM 방식의 통신시스템

1. 무선 LAN

기존의 IEEE 802.11 무선 LAN은 DS-SS, FH-SS, IR(InfraRed) 방식을 사용하여 2.4GHz ISM (Industrial, Scientific, and Medical) 대역에서 2 Mbps의 전송률을 지원하였다[5]. 그러나 이러한 규격으로는 증가해가는 높은 전송속도에 대한 요구를 만족시킬 수 없어, 1999년 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b의 새로운 물리 계층 표준안이 확정되었다[6]. IEEE 802.11b는 2.4GHz 대역에서 기존의 DS-SS 방식을 확장한 CCK(Complementary Code Keying) 방식을 사용하여 11Mbps의 전송률을 지원하며, 현재 상품화가 되어 널리 보급이 이루어지고 있다. 한편, IEEE 802.11a는 5GHz 대의 U-NII (Unlicenced National Information Infrastructure) 비면허 대역에서 DS-SS 방식의 한계를 극복하고 더 높은 전송속도를 얻기 위하여 OFDM 변조방식을 채택하였다. 에러 정정을 위하여는 부호율 1/2, 2/3, 3/4의 컨볼루션 부호기와 1/2 비터비 복호기를 사용하며, 부반송파 변조에는 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM을 사용한다. 즉, 채널의 상황에 따라 위의 부호기와 변조기를 조합하여 6~54Mbps의 고속 가변 전송률을 지원한다. 실내환경에서의 이더넷 기반 서비스를 목표로 하기 때문에 52개 부반송파의 간단한 구조를 가지며, OFDM 방식을 사용함으로써 짧은 훈련시간 및 간단한 등화가 가능하고, 다중경로 간섭에 강건한 장점을 가진다. 또한, 2001년 11월 IEEE 802 회의에서 기존의 2.4GHz 대에서 고속의 데이터 전송을 위한 IEEE 802.11g의 표준안으로서 OFDM 전송 방식을 선정하고, IEEE 802.11b와의 backward compatibility를 위하여 CCK 프리앰블을 앞부분에 추가한 CCK-OFDM 방식을 mandatory mode로 결정하였다. 한편, 유럽의 ETSI BRAN에서 제안한 HIPERLAN/2 규격은 IEEE 802.11a와 유사한 OFDM 방식의 물리계층을 갖고 있으며, MAC 계층으로는 IEEE 802.11에서 사용하는 CSMA/CA와는 달리 TDMA 방식을 사용하여 QoS를 쉽게 제공할 수 있다[7]. 즉, 이더넷 기반에서만 사용되는 IEEE 802.11과는 달리 HIPERLAN/2는 이더넷, IP, UM-TS, ATM, IEEE 1394 등 여러 형태의 코어 네트워크에 연결하기 위한 convergence layer를 갖는 것이 특징이다. <표 1>은 OFDM 방식을 사용한 기존 통신시스템의 주요 파라미터를 보여준다.

2. BWA

인터넷의 급속한 보급과 대용량 멀티미디어 서비스에 대한 요구 증가로 수 km 내의 옥내 또는 중소

<표 1> OFDM 방식의 통신시스템

항목	무선 LAN (802.11a)	BWA (802.16b)	DAB (Eureka-147)	DVB-T	ADSL	VDSL	ACIS	W-OFDM
반송파 수	52	52~850	192~1536	1075/6817	256	2783	120	528
FFT 크기	64	64~2048	256~2048	2048/8192	512	8192	128	1024
반송파간격(kHz)	312.5	2.8~312.5	1~8	1.116/4.464	4.3125	4.3125	6.25	8
심볼주기(us)	4.0	4.0~369.6	156~1246	231~280/ 924~1120	250	약 250	200	156.25
보호구간길이(us)	0.8	0.8~11.2	31~246	7~56/ 28~224	16	18	40	31.25
샘플링주기(us)	0.05	0.05~0.2	0.5	0.13	0.452	0.0283	1.25	0.12
사용대역	5~6GHz	5~6GHz	VHF~UHF	VHF~UHF	25~1104 kHz	0.138~12 MHz	2GHz	NA
대역폭(MHz)	20	5~20	2.048	9.14	1.1	12	0.8	5
채널코딩	컨볼루션 코드 1/2~3/4	컨볼루션+ RS 1/2~3/4	컨볼루션 코드 1/4~3/4	컨볼루션+ RS 1/2~7/8	RS	RS	RS 1/2	컨볼루션 또는 RS 1/2
변조방식	BPSK QAM(4~64)	QPSK QAM(16,64)	DQPSK	QPSK QAM(16,64)	2^1~2^{15} QAM	2^1~2^{15} QAM	DQPSK	QPSK
MAC 듀플렉싱	CSMA/CA	TDMA OFDMA TDD	-	-	FDD	FDD	DPA	DPA
전송률(Mbps)	6~54	1.7~61.7	0.6~1.7	4.98~31.67	Max. 8	Max. 52	Max. 2 (0.6)	Max. 5(3.4) Microcell: 10
이동성	보행자(3m/s)	고정	vehicle	vehicle	고정	고정	NA	NA
환경	옥내: 40m 옥외: 200m	옥외: 수 km	방송	방송	유선	유선	셀룰러	셀룰러

사업장에 대한 광대역 액세스 수요가 증가하여 현재 xDSL(Digital Subscriber Line)이나 케이블을 이용한 기술들이 이미 상용화되어 광범위하게 서비스되고 있다. 그러나, xDSL 기술이 가지는 거리의 제한이나 케이블 가설에 소요되는 고비용 등을 쉽게 극복할 수 있고, 상대적으로 저렴한 유지비 등 여러 가지 장점으로 인해 BWA 기술이 새로운 광대역 무선 액세스 기술로 주목을 받고 있다. BWA 표준화와 관련해서는 IEEE 802.16 워킹그룹이 WirelesMAN™ 이라는 이름으로 1999년 이래 현재까지 활발한 활동을 하고 있다[8]. IEEE 802.16에는 4개의 TG가 존재하는데, 이 중 TG3와 TG4는 서로 다른 주파수 대역을 위한 무선 인터페이스 표준 802.16a와 802.16b를 작성함으로써 기존의 802.16을 확장시키는 작업을 하고 있다. IEEE 802.16a는 2~11GHz 면허대역에서의 사용을 목적으로 하는 무선인터페이스 표준이며, IEEE 802.16b는 주로 5~6GHz대 비면허 대역에서의 사용을 위한 무선인터페이스 표준이다. TG3는 초기부터 여러 가지의 물리계층 제안을 두고 크게 OFDM 방식과 SCFDE(Single Carrier with Frequency Domain Equalization) 방식 사이에 경합을 벌이다가, 결국 2001년 3월 OFDM과 SC-FDE 두 변조 방식을 모두 지원하는 것으로 결정하고 드래프트 작성을 개시하였다. 반면, TG4는 비면허 대역을 사용하는 만큼 여러 가지 환경에서 유연하게 동작하는 더 융통성 있는 시스템의 구현을 목적으로 하였으며, 처음부터 IEEE 802.11a의 OFDM 물리계층을 기본으로 하여 Wireless HUMAN™ 표준안을 작성하고 있다. Wireless HUMAN™을 예를 들어 보면, 많은 간섭 현상으로 협대역 채널이 유리한 도심의 밀집 지역으로부터 좀 더 넓은 대역폭의 채널이 유리한 비밀집 지역에 이르기까지 여러 가지 시나리오에서 동작할 수 있도록 5, 10, 20MHz의 대역폭을 사용하며, 지연시간에 따

라 64, 256, 2048의 FFT 크기를 사용하여 여러 가지 환경에 유연하게 대응할 수 있도록 되어 있다. 에러정정을 위하여는 1/2, 2/3, 3/4의 컨볼루션 부호기와 RS 부호기를 사용하며, 부반송파 변조에는 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM을 부호기로 사용하여 채널의 상황에 따라 가변 전송률을 지원한다. 5MHz 대역폭의 사용은 선택사항이며, 듀플렉싱 방식으로는 TDD를 이용하고, 64, 256 FFT 모드에는 TDMA를, 2048 FFT 모드에는 OFDMA를 다중접속방식으로 사용한다. OFDMA 방식을 이용함으로써 각 가입자들에 대하여 좀더 효율적으로 자원을 배분할 수 있으며, 각 부채널에서의 개별적인 순방향 전력제어(forward APC)가 가능해진다. 즉, 각 가입자까지의 링크 상황에 따라 적응적으로 ±6dB의 신호 전력 레벨을 조정할 수 있다. 한편, 유럽의 ETSI BRAN에서도 위와 비슷한 개념의 HIPER-ACCESS와 HIPERMAN의 두 가지 프로젝트가 진행중에 있다.

3. Digital Broadcasting

현재 지상파 디지털 라디오 방송 시스템은 크게 유럽식, 미국식, 일본식이 있으며 모두 OFDM 방식을 채용하고 있다. 이중 유럽의 DAB(Digital Audio Broadcasting) 방식인 EUREKA-147은 디지털 변조방식으로 지상파에서의 다중 경로 페이딩에 강건한 COFDM을 사용하며, 1.5MHz의 전송 대역폭을 사용하여 단일 송신기로 고음질의 스테레오 프로그램과 데이터를 다중화시켜 방송할 수 있다[9]. 이때 가능한 프로그램 수는 비트율, 오류정정, 데이터 용량 등에 따라 결정된다. 수신은 간단한 휩(whip) 안테나로 가능하며 도심지 등의 다중경로가 많은 조건에서도 잡음 발생 없이 우수한 성능을 발휘한다. OFDM 방식은 서로 다른 송신기에서 전송한 동일 신호가 특정한 시간 지연을 두고 수신될 경우 두 신호의 합은 서로 간섭을 주지 않으므로, 적은 전력으로 다수의 방송국을 이용하는 단일 주파수망(Single Frequency Network: SFN) 구성에 용이한 장점이 있다. 이 외에도, OFDM 신호는 랜덤 신호의 특성을 가지므로 다른 채널에 단지 랜덤 잡음으로 작용하는 효과를 나타내며, 널(null) 부반송파를 할당하기 쉬우므로 기존의 채널과 중첩될 경우 이를 쉽게 의도적으로 회피할 수 있다.

유럽 디지털 TV 및 데이터 방송을 위한 DVB (Digital Video Broadcasting) 시스템에서는 지상파(DVB-T) 방송용 변조방식으로 COFDM을 사용한다[10]. 위성 및 케이블 채널과 다르게 지상파 전송 채널에는 심각한 다중 경로, 상대적으로 큰 인위적인 잡음, 그리고 아날로그와 디지털 TV 신호간의 상호 간섭이 존재하는데, 이런 다중 경로의 영향은 아날로그 텔레비전에서 Ghost 현상으로 나타나고, 디지털 텔레비전에서는 심볼간 간섭이 나타나 심할 경우에는 디코딩 자체가 불가능해진다. 한 개의 반송파에 높은 속도의 디지털 신호열을 보낼 때 심볼 주기가 짧아져 이런 현상이 더욱 심해지기 때문에, OFDM 방식을 사용하여 다중 경로의 영향을 극복한다. 또한, OFDM 방식은 SFN의 구현을 가능하게 하기 때문에 방송용 주파수 스펙트럼의 포화 현상을 극복할 수 있다. 전송모드는 FFT 크기에 따라 8K 모드와 2K 모드로 나누어지며, 다시 보호구간의 길이에 따라 4가지 모드로 나누어진다. 8K 모드는 단일 송신기를 사용하는 시스템이나 다수의 고출력 송신기로 SFN을 구성하기에 적합하다. 8K 모드에서는 6,817개의 실제 부반송파와 1,375개의 가상 부반송파를 사용하고, 이 6,817개의 부반송파는 117개의 연속 파일럿과 569개의 분산 파일럿을 포함한다. 여기서 연속 파일럿은 심볼에 관계없이 항상 규정된 복소 신호를 전송하는 부반송파이며, 또한 심볼에 관계없이 항상 위상이 연속이다. 그리고 분산 파일럿은 연속 파일럿과 같이 규정된 복소 신호를 전송하나, 심볼에 따라 그 위치가 주기적으로 변화한다. 2K 모드는 단일 송신기를 사용하는 시스템으로 소출력 송신기로 SFN을 구성하는 데 적합하고, 1,705개의 실제 부반송파와 343개의 가상 부반송파로 구성되며, 1,705개의 부반송파에는 45개의 연속 파일럿과 143개의 분산 파일럿이 포함된다. 대역폭은 7.61MHz이고 QPSK, 16-QAM, 64-QAM

변조 방식을 지원하여 높은 전송률(코딩 후 4.98~31.67Mbps)을 지원한다. 원천 부호화와 멀티플렉싱된 데이터는 RS(204,188,8) 부호화를 거쳐 바이트 단위로 인터리빙되고, 컨볼루션(부호화율 1/2, 구속장 7) 부호화 된 후, 비트 단위로 다시 인터리빙된다. 그런 다음 원하는 전송률에 따라 QPSK, 16-QAM, 64-QAM 등으로 변조된 후, OFDM 심볼이 생성되어 전송되는 구조로 되어 있다. 컨볼루션 부호화는 부호화 후 puncturing 과정을 통해 1/2부터 7/8까지 5가지의 부호화율을 지원한다.

4. ADSL/VDSL

기존의 전화선을 이용하는 ADSL(Asymmetric DSL)은 DMT(Discrete Multi-Tone) 방식을 사용하여 640kbps의 업스트림과 약 8Mbps의 다운스트림 전송속도로 인터넷 접속과 홈쇼핑 등의 비대칭 서비스를 제공한다[11]. DMT 방식은 고속의 무선 데이터 전송에 적합한 OFDM 방식과 유사하나, 유선채널에 필요한 다음의 추가적인 기능을 포함하고 있다. 즉, DMT 방식에서는 채널의 전송용량을 최대화하기 위해 주어진 채널의 주파수 특성을 측정하여 각 부채널의 SNR에 따라 constellation 크기(2^2~2^{15} QAM)를 최적화하는 bit-loading 알고리즘을 사용한다. 이러한 bit-loading 과정을 통해서 각 부반송파마다 최적의 비트 수를 할당하여 높은 전송률을 얻을 수 있다. 또한, 유선채널에서는 임펄스응답이 매우 긴 특징이 있어 심볼간 간섭을 막기 위하여는 CP 구간이 매우 커지는 단점이 있기 때문에, 이를 줄이기 위하여 간단한 시간영역 등화기를 사용하여 임펄스응답을 CP 구간 이내로 단축하는 기법을 사용한다.

또한, 디지털 TV, SOHO 사용자의 증가, 광케이블의 보급 등으로 더욱 고속의 데이터 전송이 요구될 것으로 예상이 되어, 최근 고속의 하향 전송속도를 갖는 VDSL(Very-high-rate DSL) 시스템에 대하여 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다[12]. VDSL 방식은 약 12MHz의 대역폭을 이용하여 가변적인 비대칭성과 함께 52Mbps까지의 초고속 전송률을 지원하는데, 이를 위하여 역시 DMT 방식이 제안되어 있다. VDSL에 사용되는 Zipper DMT 방식은 DMT 심볼간 간섭의 제거 및 부반송파간 직교성 유지를 위한 Cyclic Prefix(CP) 이외에, 업스트림과 다운스트림 간의 직교성을 유지하여 NEXT (Near-End Cross-Talk)의 영향을 없애주기 위한 Cyclic Suffix(CS)가 DMT 심볼의 뒷부분에 추가로 삽입되는데, 그 길이는 선로의 전송 지연(propagation delay) 시간에 맞추어 결정된다. Zipper DMT 방식에서는 ADSL에서와 같이 임펄스응답의 길이를 줄이기 위하여 시간영역 등화기를 사용하지 않고 심볼주기의 값을 크게 설정함으로써, CP와 CS의 오버헤드에 따르는 효율저하를 보상한다. 따라서, 고속에서 동작하는 큰 크기(4K/8K)의 저전력 FFT를 설계하는 기술이 필요하다. 또한, Zipper DMT 방식은 대역내 업스트림과 다운스트림 대역의 할당이 자유로운 유연성을 가지는 장점이 있는 반면, NEXT의 영향을 완전히 제거하기 위하여는 네트워크 내의 모든 모뎀이 동기화 되어야 한다는 단점이 있다. 이의 극복을 위한 비동기식 Zipper DMT 방식에서는 송신단에서 pulse shaping을 사용하고, 수신단에서 windowing을 사용하여 NEXT 영향을 최소화하고 RFI(Radio Frequency Interference)의 영향을 감쇄시킨다.

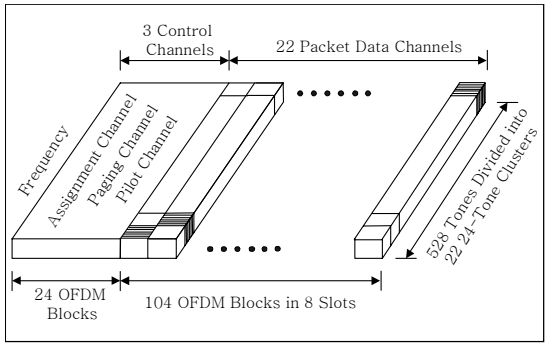
5. Cellular Internet Service

AT&T에서는 가까운 미래에 무선 인터넷 접속의 수요가 급속히 증가할 것으로 예상하여 1998년에 셀룰러 환경에서 무선 인터넷 서비스를 제공하기 위한 ACIS(Advanced Cellular Internet Service)를 제안하였으며, 2000년에 이를 개선한 광대역 무선 데이터 액세스 방식을 발표하였다[13],[14]. 1998년에 제안한 ACIS는 2GHz 대역의 매크로셀 환경에서 1MHz의 대역폭을 사용하여 이동 가입자에게 최대 1~2Mbps 전송률의 인터넷 서비스를 제공하는 것을 목표로 하였다. 2GHz 대역 매크로셀 환경에서는 지연확산이 약 40us까지 이를 수 있기 때문에 단일 반송파 방식을 사용하여 고속에서 전송할 경우

수신단에서 많은 등화기 탭 수와 긴 등화기 훈련시간을 필요로 하게 되므로, ACIS에서는 이와 같은 다경로 지연 확산의 효과를 줄이기 위하여 OFDM 전송 방식을 도입하였다. 또한, 하향링크에서의 link budget을 개선하기 위하여 Clustered OFDM 방식을 사용한 다중 기지국 전송안테나와 2개의 안테나를 사용한 수신 다이버시티를 결합하여 약 10dB의 SNR 개선을 이루도록 하고 있다. 각 부반송파의 데이터들을 서로 다른 안테나를 통해 나누어 전송하는 Clustered OFDM 구조의 전송 다이버시티는 한 안테나 당 전송되는 부반송파의 수를 감소시킴으로써 PAR을 최소화하고, 동시에 RS 부호와 결합하여 부호화 이득을 얻을 수 있다. 마지막으로, ACIS에서는 주파수의 효율적인 사용을 위하여 DPA(Dynamic Packet Assignment) 알고리즘을 사용하였다. 이는 기존의 CS(Channel Segregation) 개념에 interference-sensing 개념을 추가한 것으로서, 채널의 상태를 검사하여 채널의 우선 순위를 정한 다음, 그 우선 순위에 따라 채널을 패킷단위로 할당하는 방식이다. 채널 할당 시에 인접 기지국들이 동시에 같은 채널을 선택하는 것을 방지하기 위하여 한 번에 한 기지국만이 채널을 할당할 수 있는 staggered 프레임 구조를 사용하였다.

AT&T에서 2000년에 제안한 광대역 무선데이터 액세스 방식 역시 셀룰러 환경에서 무선 인터넷 서비스를 제공하기 위하여 ACIS의 발전된 형태를 취하고 있다[14]. 이 방식에서는 하향 패킷 데이터 모드에서 약 5MHz 대역폭의 광대역 OFDM(W-OFDM) 구조를 사용하여 매크로셀 환경에서 2~5Mbps, 마이크로셀 환경이나 실내 환경에서 약 10Mbps의 전송률을 지원한다. 또한, 이 방식에서는 Sony가 제안한 OFDM과 SFH(Slow Frequency Hopping)-TDMA 구조를 결합한 BDMA(Band Division Multiple Access) 방식을 채용하여 시간 및 주파수 다이버시티 효과를 지원하고 있다. 즉, 기존 ACIS 방식에서는 다중 송신안테나를 사용하여 주파수 다이버시티 효과를 얻었으나, 이 방식에서는 5MHz의 광대역 OFDM을 사용하므로 충분한 수의 부채널이 확보되어 전송 다이버시티 없이 한 개의 단일 안테나로 필요한 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. AT&T에서 제안한 이 광대역 OFDM 방식은 OFDM 기반의 물리계층에 DPA 기반의 다중 액세스 방식을 적용하였으며, 여기에 적응 변조 및 부호화, 스마트 안테나, space-time coding을 결합하여 여러 환경에서 다양한 비트 전송률을 제공할 수 있도록 하였다. 또한, 이러한 기술을 이용하여 고속의 데이터 서비스를 필요로 하는 large-resource와 작은 지연시간을 갖는 small-resource 모두를 지원하는 프레임 구조를 제안하였다. (그림 4)는 광대역 OFDM 방식에서 DPA 자원할당을 위한 프레임 구조를 보여 준다.

여기서 하나의 OFDM 심볼은 528개의 부반송파로 이루어져 있으며, 전체 부반송파는 24개의 부반송파로 구성된 22개의 클러스터로 나누어진다. 이때 부반송파간의 간격은 8kHz이므로 전체 대역폭은 4.224MHz가 되며, 시간적으로 하나의 프레임은 20ms 주기를 갖고, 한 프레임은 128개의 OFDM 블록으로 구성된다. 이 중 초기부분의 24개 OFDM 블록은 채널할당과 DPA를 수행하는 제어 오버헤드부이며, 나머지 104개의 OFDM 블록은 13개의 OFDM 블록으로 구성된 8개의 시간 슬롯으로 나누어진다. 따라서, 이 프레임 구조에서는 각 프레임마다 22개의 클러스터(i.e., resource)가 8번의 주파수 호핑을 수행하게 된다. 여기서 22개의 클러스터에 대한 채널의 할당은 staggered 프레임 구조의



(그림 4) 광대역 OFDM의 DPA 자원할당을 위한 프레임 구조

DPA 알고리즘에 의하여 간섭이 최소화 되도록 수행된다. 즉, 각 클러스터는 주어진 주파수 호핑 패턴에 따라 도약하며, 8개의 트래픽 슬롯에 걸쳐서 부호화가 이루어지므로 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있어 페이딩 채널에서 성능향상을 위한 부호화 이득을 얻을 수 있다. 이 구조에서 한 OFDM 블록의 주기는 156.25us, 보호구간은 31.25us을 사용하였다. 총체적으로 OFDM 블록 보호구간, 동기화, DPA 제어 등의 오버헤드를 고려할 경우 2.1296Mbps의 전송률을 얻을 수 있다. Small-resource 서비스를 위해서는 각 시간 슬롯을 다시 4개의 미니 슬롯으로 나누고, 각 슬롯마다 하나씩의 작은 resource를 할당하여 각 미니슬롯마다 주파수 호핑을 한 번씩 수행한다. 이 경우는 작은 지연시간을 요구하는 서비스에는 유리하지만 증가되는 TDMA 오버헤드로 인해 전송률 면에서는 손실이 있게 된다. 마지막으로 이 구조에 120° 섹터 안테나를 도입하고 1개의 송신 안테나와 2개의 수신 안테나를 사용한 빔형성 및 interference suppression 테크닉을 결합하면, 기지국마다 약 2~5Mbps의 전송률을 갖는 패킷 데이터 서비스의 구현이 가능하다.

한편, AT&T와 Nortel은 2000년 9월에 4G Access라고 불리는 무선 네트워크를 제안하였는데, 하향링크에는 광대역 OFDM을 사용하고, 상향링크에는 기존의 EDGE(Enhanced Data Rates for GSM Evolution)를 채용하였다. 이 방식에서는 800 kHz의 대역폭을 사용하여 저속의 이동환경에서는 약 10Mbps의 전송률, 고속의 이동환경에서는 384 kbps의 전송률을 제공한다. 또한, 인터넷 기반의 4G 네트워크에서는 순방향에서 20Mbps(셀당 100 Mbps)의 전송률, 20bps/Hz/cell/carrier의 주파수 효율, 0.1초의 dormant-to-active transition time이 요구될 것으로 예상하였는데, 이는 3G UMTS의 사양인 3.8Mbps의 전송률, 0.8의 주파수 효율, 2초의 transition time에 비하여 크게 향상된 것이다. 이러한 사양을 만족하기 위하여 필요한 기술은 광대역 software radio, FFT를 포함한 DSP 코어, 다중 빔 안테나, space-time coding, 비선형 보상 전력증폭기 등의 기술이 될 것으로 예상한다.

IV. OFDM 기반의 Mobile Access를 위한 요소 기술

1. OFDM 성능향상 기법

OFDM 방식은 주파수 효율이 높고, 다중경로 페이딩을 쉽게 극복할 수 있으며, 환경에 따라 적응적으로 전송률을 쉽게 가변할 수 있기 때문에, 고속의 전송을 요구하는 IEEE 802.11a에 효과적으로 적용되었다. 이러한 무선 LAN은 옥내·외의 좁은 영역에서 주로 서비스를 제공하기 때문에, 지연확산이 상대적으로 적어 IEEE 802.11a 표준에 정의된 800ns의 보호구간으로 심볼간 간섭을 충분히 보상할 수 있다. 그러나, 옥외에서 무선으로 데이터를 전송할 경우, 지연확산이 커져 긴 보호구간이 필요하게 되며, 이러한 오버헤드에 따른 효율감소를 막기 위하여는 심볼주기가 매우 커져야 한다. 이를 위하여 IEEE 802.16b에서는 최대 2K FFT를 사용하고, VDSL에서는 8K FFT를 사용한다. 그러나 거의 변하지 않은 시불변 채널에서 데이터를 전송하는 IEEE 802.16b나 VDSL과 같은 경우에는 이와 같이 심볼주기가 길어지는 것이 큰 문제가 되지 않으나, 셀룰러 환경에서와 같이 채널이 빠른 속도로 변하는 경우에는 심볼주기 내에서 채널이 변화하게 되어 ICI(InterChanel Interference)를 발생시키게 된다. 따라서, OFDM 방식을 사용하여 Mobile Access를 하고자 할 경우 고속 이동체에서의 전송을 위하여는 ICI 문제를 해결할 수 있는 기법이 필요하다[15],[16]. 또한, FFT의 크기가 커짐에 따라 증가하는 PAR의 감소기법, 반송파 주파수 오프셋 동기화 기법에 대한 연구와 고속에서 저전력으로 동작할 수 있는 큰 크기의 FFT 설계기술이 필요하다. 특히, 전력증폭기는 4G 기지국에서 사용되는 부품 비용의 70% 까지를 차지할 수 있기 때문에 디지털 predistorter와 같은 비선형 왜곡 보상기 설계기술을 필요로 한다[17].

또한, OFDM 방식을 사용하여 Mobile Access를 하고자 할 경우에는 유선환경인 ADSL과 VDSL에서 사용되는 bit-loading 알고리즘과 유사한 기법을 적용하여 주어진 채널에 최적화된 적응변조기법으로 고속의 전송률을 제공할 수 있다. 특히, Beyond IMT-2000 시스템에서는 고속의 데이터 전송을 위하여 20MHz의 광대역을 사용할 예정이기 때문에 채널의 주파수 선택성(frequency selectivity)이 더욱 커지게 되며, 이 경우 현재와 같이 모든 부채널에 동일한 변조방식을 적용할 경우 매우 비효율적이 된다. 즉, 주어진 부채널의 SNR 상황에 따라 최적의 변조방식을 사용하여 다른 변조방식을 사용할 경우, 주어진 채널의 용량을 극대화 할 수 있다. 이 경우, reliable한 피드백 채널이 반드시 필요하게 되어 이에 대한 연구가 필요하다.

2. MIMO/스마트 안테나

순방향에서의 link budget을 향상시키기 위하여 단말기에 적은 수의 안테나에 의한 다이버시티를 활용하면서 기지국에 다중 안테나를 사용하는 기법에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. 즉, 송·수신단에 다중 안테나를 사용함으로써 독립적인 페이딩 채널을 다수 개 형성하여 다이버시티 이득과 코딩 이득을 동시에 얻으며, 이로 인하여 순방향의 고속 데이터 전송에 요구되는 높은 link budget을 어느 정도 해결할 수 있도록 한다[18],[19]. 현재 널리 사용되는 open loop 방식으로는 3GPP W-CDMA 표준으로 채택된 STBC(Space-Time Block Code)와 이러한 다이버시티 이득과 트렐리스 부호화의 이득을 동시에 얻을 수 있는 STTC(Space-Time Trellis Code)가 있다. 이러한 방식을 OFDM 전송기법에 적용하기 위하여는 시간과 공간을 이용하여 부호화하는 기존의 STBC를 각 부반송파에 대하여 시간과 공간으로 부호화하는 형태로 수정한 SFBC(Space-Frequency Block Code)가 필요하고, 시간과 공간에 대하여 부호화한 기존의 STTC를 공간과 부반송파에 대하여 부호화하는 SFTC (Space-Frequency Trellis Code)가 요구된다. 또한, 전술한 바와 같이 긴 OFDM 심볼을 고속에서 전송할 경우 채널간 간섭이 발생하기 때문에 SFBC 방식을 그대로 사용할 경우 성능저하가 크게 발생하여 이를 개선할 수 있는 방식이 요구되며, 다중 안테나를 사용한 OFDM 시스템의 파일럿 톤 설계 시 orthogonality가 만족되지 않으면 파일럿 톤이 간섭 신호로 작용하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 최근 Bell Lab에서 제안한 BLAST(Bell Lab Layered Space Time)의 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 방식 역시 OFDM 전송기법에 적용할 경우 데이터 전송속도를 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 기지국에 스마트 안테나 기법을 적용함으로써 다른 방향에서 입사되는 co-channel interference를 감소시켜, 순방향의 고속 데이터 전송에 요구되는 link budget 또는 채널용량을 크게 향상시킬 수 있다. 현재 제안되어 있는 많은 스마트 안테나 기법들이 OFDM 시스템에 쉽게 적용될 수 있으나, OFDM 시스템에서는 출력신호가 FFT의 출력으로 주파수영역 신호이고 스마트 안테나는 시간영역에서 동작하기 때문에, 출력신호를 이용하여 OFDM 기반의 스마트 안테나를 설계하고자 할 경우에는 이에 대한 고려가 필요하다.

3. 다중접속방식

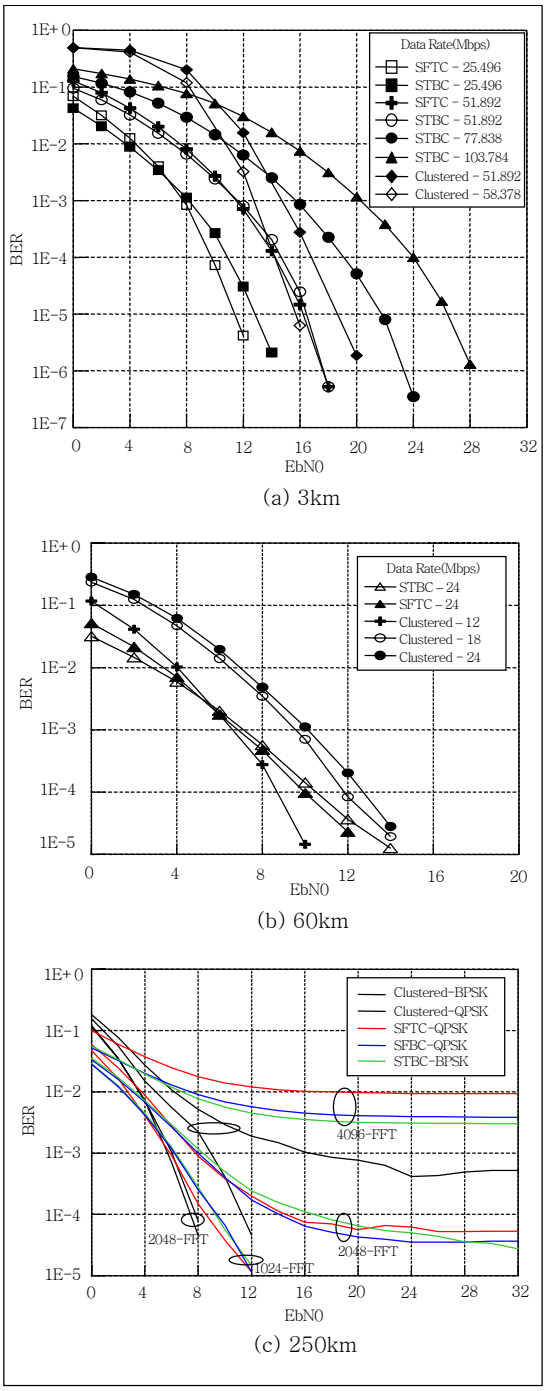
OFDM 방식을 상향링크에서 사용하고자 할 경우에는 각 단말기마다 전송지연, 도플러 주파수 등이 모두 다르기 때문에, OFDMA나 OFDM-CDMA 방식을 적용하기가 쉽지 않아 일반적으로 OFDM-TDMA 방식을 사용한다. 또는, 일반적으로 상향링크에서 요구되는 전송률은 높지 않으므로 기존의 EDGE 또는 CDMA 방식을 그대로 사용할 수 있다. 하향링크에서 OFDM 방식을 사용하고자 할 경우에는 위의 세 가지 방식을 모두 적용할 수 있다. 그 중 OFDM-TDMA 방식은 각 사용자마다 전체의 대역폭이 주어지므로 사용자가 요구하는 전송속도에 따라 각 프레임 내에서 할당되는 OFDM 심볼의 수를 변화시킴으로 자원할당이 이루어진다. 이 OFDM-TDMA 방식에서는 각 사용자마다 데이터를 수신하

기 전에 프리앰블을 사용하여 초기화를 하여야 하므로 전송효율이 감소하게 된다. 따라서, 이 경우 오버헤드를 줄이기 위하여 상대적으로 큰 페이로드가 적용된다. 예를 들어, IEEE 802.11a는 이더넷 기반에서 동작하므로 페이로드가 크고 채널환경의 변화가 없기 때문에 OFDM-TDMA를 상·하향링크에서 적용하며, 이와 같이 작은 크기의 FFT를 사용할 경우에는 일반적으로 OFDM-TDMA가 적절한 선택이 된다. OFDMA는 각 사용자가 요구하는 전송속도에 따라 부반송파의 개수를 다르게 할당함으로써 자원분배를 효율적으로 할 수 있다. 이 방식은 특히 부반송파의 개수가 많을 경우 일반적으로 각 부반송파마다 채널 상황이 다르기 때문에, 부채널의 SNR에 따라 다른 변조방식을 사용하여 채널용량을 최적화시킬 수 있다. 따라서, 큰 크기의 FFT를 사용할 경우에는 OFDMA 방식이 유리하다. 예를 들어, IEEE 802.16ab에서는 512 이하의 FFT를 사용할 경우에는 OFDM-TDMA를 적용하고, 512~4096 FFT를 사용할 경우에는 OFDMA를 적용한다.

셀룰러 환경에서 광대역 OFDM을 사용할 경우 동적채널할당 기법과 결합함으로써 매우 높은 주파수 효율을 얻을 수 있다. 1세대와 2세대 셀룰러 시스템에서는 일반적으로 고정채널할당방식을 사용하고, DS-CDMA 또는 WCDMA에서는 interference averaging 방식을 사용한다. 이러한 interference averaging 방식은 고정채널할당방식에 비하여 간섭신호를 제거하는 데 우수한 성능을 보이나, 동적채널할당기법과 같은 interference avoidance 방식을 사용할 경우 interference averaging 방식에 비하여 2~3배 높은 주파수 효율을 얻을 수 있다. 이러한 동적채널할당기법을 구현하기 위하여 광범위한 신호측정과 빠른 채널 재할당이 요구되는데, 기존의 시스템에서는 이것을 적용하기가 쉽지 않았으나, OFDM 방식에서는 시간과 주파수 축에서 orthogonal한 부채널이 잘 정의되어 있고 OFDM의 특성상 모든 부채널에서 간섭신호와 경로손실을 빠르게 측정할 수 있으므로 동적채널할당기법을 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

<표 2> Beyond IMT-2000 시스템의 Mobile Access를 위한 주요 OFDM 파라미터

이동성	다이버시티 구조	변조방식	부호화율	전송률(Mbps)	FFT 크기	심볼길이(us)
3km/h	STBC	QPSK	-	25.496	4096	236.8
		16 QAM		51.892		
		64 QAM		77.838		
		256 QAM		103.784		
	SFTC	QPSK		25.496		
		16 QAM		51.892		
	Clustered OFDM	64 QAM	2/3	51.892		
			3/4	58.378		
60km/h	STBC	QPSK	-	24.000	2048	128.0
	SFTC	QPSK	-	24.000		
	Clustered OFDM	16 QAM	1/2	24.000		
		QPSK	3/4	18.000		
		QPSK	1/2	12.000		
250km/h	Clustered OFDM	BPSK	1/2	6.000 6.486	2048 4096	128.0 236.8
		QPSK	1/2	12.000 12.973	2048 4096	128.0 236.8
	STBC	BPSK	-	10.000 12.000 12.973	1024 2048 4096	76.8 128.0 236.8
	SFBC SFTC	QPSK	-	20.000 24.000 25.945	1024 2048 4096	76.8 128.0 236.8



(그림 5) 이동속도에 따른 OFDM 시스템의 BER 성능

4. 모의실험

Beyond IMT-2000 시스템의 Mobile Access에서 OFDM 전송방식의 적용 가능성을 살펴보기 위하여 수행한 모의실험 결과를 요약하면 다음과 같다. ITU-R WP8F의 보고서에 명기된 권장 사항을 따라 각 3km/h, 60km/h, 250km/h의 이동환경 하에서 OFDM 방식의 성능을 확인하기 위하여, <표 2>에 각각의 환경에 적합한 다이버시티 기법 및 주요 OFDM 파라미터를 제시하였다. 이 표의 파라미터들은 이동성 정도에 따른 채널간 간섭의 영향 및 요구되는 전송률 등을 고려하여 설정되었으며, 모두 2개의 송신 안테나와 2개의 수신 안테나를 사용하였다. (그림 5)는 이 경우 이동속도에 따른 OFDM 시스템의 BER 성능을 보여 준다. 3km/h 환경의 경우 QPSK~256QAM 변복조를 사용하여 25.496~103.784 Mbps의 전송률을 낼 수 있다. 권고사항에서 요구하는 100Mbps의 전송률이 이 상황 하에서 가능하나 높은 SNR이 요구되며, 요구 SNR을 낮추기 위해서는 안테나 수를 증가시키는 방법 등을 필요로 한다. <표 2>와 (그림 5)로부터 60km/h 환경의 경우 24 Mbps, 250km/h 환경의 경우 6Mbps의 전송률이 가능함을 알 수 있으며 (10^{-4}의 BER에서 8dB SNR 기준), 이는 ITU-R WP8F의 보고서에 명기된 권장 사항을 모두 만족한다.

V. 결 론

본 고에서는 Beyond IMT-2000 시스템의 Mobile Access에서 요구되는 고속 데이터 전송을 위하여 OFDM 방식을 사용한 기존의 통신시스템에 대하여 요약한 후, Mobile Access에 OFDM 전송방식을 적용할 경우의 성능을 모의실험을 통하여 살펴보았다. OFDM 방식은 주파수 효율이 높고, 간단한 단일탭 등화기로 고속 전송 시 급격히 증가하는 심볼간 간섭의 보상이 가능하며, FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 최근 고속 데이터 무선 통신을 위한 전송방식으로 무선 LAN 등에 채택되어 왔다. 특히, 이동통신시스템에서는 저/중/고속의 데이터율을 동일한 무선전송 플랫폼에서 지원하는 것이 바람직하기 때문에, 부반송파 수와 부채널의 변조방식을 채널 상황에 따라 조절함으로써 서비

스의 종류를 쉽게 다양화 할 수 있는 OFDM 기반기술은 Mobile Access 전송방식 후보 중에 가장 가능성 있는 방식이 될 수 있다. 또한, OFDM 방식은 부채널의 특성을 쉽게 모니터링할 수 있기 때문에 동적채널할당기법과 같은 효율적인 자원할당기법과 결합하여 주파수 효율을 크게 향상시킬 수 있으며, OFDM 방식은 WP8F 보고서에서 IMT-2000 이후의 기술로 제안된 MIMO와 스마트 안테나 기술과 결합하여 무선 link budget 또는 채널용량을 크게 증가시킬 수 있다. 단지, OFDM 방식은 무선 LAN과 같이 이동성을 많이 필요로 하지 않는 응용분야에 현재까지 주로 적용되어 왔던 이유로 하여, OFDM 기반 무선전송기술에 여하히 이동성을 부여하느냐는 것이 가장 큰 고려사항이 될 수 있다. 물론, 2세대와 3세대 시스템과의 backward compatibility를 고려하여야 하는 문제가 있으나, 이는 현재와 가까운 미래에서의 실용 가능한 기술을 선별할 경우, Beyond IMT-2000 시스템이 2세대나 3세대 시스템으로부터의 evolution 보다는 별도의 시스템으로 구현되어 전체적으로 (configurable) multi-mode 시스템으로 존재할 가능성을 배제할 수 없으며, 이 경우 SDR(Software Defined Radio) 개념을 도입한 구현에 의존할 확률이 높다. SDR 기술의 응용에서는 여러 가지로 물리적인 제약이 따르는 단말기보다는 기지국에의 활용이 보다 적극적이고 선도적일 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] ITU-R WP8F, *Report of the Fifth Meeting of Working Party 8F*, Document 8F/375-E, Aug. 2001.

[2] ITU-R WP8F, *Preliminary Draft New Recommendation(PDNR): Vision Framework and Overall Objective of the Future Development of IMT-2000 and of Systems beyond IMT-2000*, Document 8F/TEMP121-E, July 2001.

[3] 조용수, 무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초, 대영사, 2001.

[4] 김재석, 조용수, 조중휘, 이동통신용 모뎀의 VLSI 설계 - CDMA, OFDM, MC-CDMA, 대영사, 2000.

[5] ISO 8802-11, *Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications*, Jan. 1999.

[6] IEEE 802.11a, *High Speed Physical Layer in the 5GHz Band*, 1999.

[7] ETSI BRAN, *Broadband Radio Access Networks(BRAN) HIPERLAN Type 2; Physical(PHY) Layer*, TS 101 475 v1.1.1 Apr. 2000.

[8] IEEE 802.16ab-01/01r1, *An Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems Part A: Systems between 2 and 11GHz*, July 2001.

[9] ETSI EN 300 401, *Radio Broadcasting Systems: Digital Audio Broadcasting(DAB) to Mobile, Portable and Fixed Receivers*, Sep. 2000.

[10] ETSI EN 300 799, *Digital Video Broadcasting(DVB); Framing, Structure, Channel Coding, and Modulation for Digital Terrestrial Television*, June 1999.

[11] ANSI T1E1.4/97-007R6, *Asymmetric Digital Subscriber Line(ADSL) Metallic Interface*, Sep. 1997.

[12] ANSI T1E1.4/2000-013R4, *Very-high bit-rate Digital Subscriber Lines(VDSL) Metallic Interface, Part 3: Technical Specification of a Multi-Carrier Modulation Transceiver*, Nov. 2000.

[13] L.J. Cimini, J. Chuang, and N.R. Sollenberger, "Advanced Cellular Internet Service(ACIS)," *IEEE Communication Magazine*, Oct. 1998, pp. 150 - 159.

[14] J. Chuang and N.R. Sollenberger, "Beyond 3G: Wideband Wireless Data Access Based on OFDM and Dynamic Packet Assignment," *IEEE Communication Magazine*, July 2000, pp. 78 - 87.

[15] W.G. Jeon, K.H. Chang, and Y.S. Cho, "An Equalization Technique for OFDM Systems in Time-variant Multipath Channels," *IEEE Tran. on Communications*, Vol. 47, No. 1, Jan. 1999, pp. 27 - 32.

[16] Y. Li, N. Seshadri, and S. Ariyavisitakul, "Channel Estimation for OFDM Systems with Transmitter Diversity in Mobile Wireless Channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 3, Mar. 1999, pp. 461 - 471.

[17] W.G. Jeon, K.H. Chang, and Y.S. Cho, "An Adaptive Data Predistorter for Compensation of Nonlinear Distortion in OFDM Systems," *IEEE Tran. on Communication*, Vol. 45, No. 10, Oct. 1997, pp. 1167 - 1171.

[18] V. Tarokh, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction," *IEEE Tran. on Information Theory*, Vol. 44, No. 2, Mar. 1998, pp. 744 – 765.

[19] A.F. Naguib, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time Coding and Signal Processing for High Data Rate Wireless Communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 17, No. 3, May 2000, pp. 76 – 92.