

1. 핸드폰의 구동 원리

핸드폰 작동은 간단히 기지국과 교환기, 유선 케이블과 전파를 통해 이루어진다고 할 수 있다. 핸드폰은 전파를 통해 기지국과 연락을 하며 기지국과 기지국은 바닥에 깔린 광케이블, 위성 등을 통해 연결이 된다. 이 사이에는 교환기가 개입하여 무선전화 통화에 따른 여러가지 기능을 맡게 된다. 핸드폰은 수시로 해당 기지국 교환기에게 자신의 위치를 등록하게 되고, 이를 토대로 전화가 올경우 해당 위치 기지국에게 연락하여 전화 연결이 되게 한다

그림 1 핸드폰의 구동원리

셀룰러 네트워크는 자세하게 MSC와 BSS, HLR(Home Location Register), VLR(Visitor Location Register), SCP(Service Control Point), IN(Intelligent Network) 장비 등으로 구성된다. 전화 연결을 위해선 다음 다섯 가지 요소가 필요한데, - HLR (홈 위치 등록기) : 가입자의 정보를 저장하고 있는 데이터베이스로, 서비스의 종류와 홈 교환국 ID 정보를 가지고 있다. 홈 위치란 무선전화의 위치를 찾을 때 맨 처음으로 검색하게 되는 위치를 의미하는데 이는 전화번호를 통해서 간단히 체크하기도 한다. 011의 경우 서울지역 이용자는 9xxx-xxxxx 번호를 사용하게 되는데, 이때 9xxx 등이 바로 홈 위치를 찾는 데이터가 된다는 이야기이다. 일반적으로 무선전화기를 가입한 곳에서 제일 가까운 기지국이 홈 위치로 등록된다.

무선전화로 맨처음 전화를 걸게 되면 HLR 에 등록된 홈 교환국 ID 를 추적해 해당 교환국 관할 기지국 내에 무선전화가 위치해 있는지를 찾게 된다. 만일 이곳에 해당 휴대폰이 없는 것으로 결과가 나오면 VLR 의 데이터베이스를 검색하게 된다.

- VLR (방문자 위치 등록기) :

홈 교환국을 벗어난 휴대폰의 위치를 등록하는 데이터베이스이다. 휴대폰은 수시로 제일 가까운 기지국을 통해 자신의 위치를 알리게 되고, VLR 에는 자신의 핸드폰에서 가장 가까운 기지국 ID 가 등록되게 된다. 무선전화로 전화를 걸어 홈 위치에서 휴대폰을 찾지 못하면 VLR 에 등록된 기지국 ID 를 찾게 되며 이곳에서 휴대폰으로 신호를 보내 연결될 수 있도록 한다.

- MSC 간의 메시지 교환

- 메시지를 목적지까지 전송하기 위한 추적작업
- 정상적인 연결을 위한 장거리 연결(광케이블 등)

등이 그것이다.

0 핸드폰의 위치 등록

핸드폰의 전원이 켜지면 핸드폰은 가까운 기지국으로 MIN(Mobile Identification Number = 무선전화기 식별번호-전화번호) 와 ESN (Electronic Serial Number-단말기 고유번호) 메시지를 보내고, 기지국은 이 메시지를 교환기로 보내게 된다. 이때 교환기는 받은 MIN(전화번호)을 네트워크 안의 모든 MIN과 비교해 해당 휴대폰이 홈 교환국 위치인지 방문자 교환국 위치인지를 판별한다. 이때 HLR 는 해당 휴대폰의 정보를 요구하게 된다. 만일 해당 휴대폰이 외부에 있 경우 교환기는 STP(Signaling Transfer Point-신호 전송 포인트)에 저장된 라우팅 정보(추적 루트)를 이용하여 그 가입자가 속해 있는 HLR로 메시지를 보내게 된다.

이때 HLR는 이 신호를 받아 MIN(전화번호)과 ESN(단말기 고유번호) 을 이용해 번호가 유효한지 불법으로 쓰는지를 확인한 후 위치정보를 HLR에 등록하고 해당 휴대폰 정보를 외부 방문 교환국으로 보낸다. 이때 외부 방문 교환국에서는 이를 수신해 이를 VLR(방문자 위치 등록기)에 저장해 이용자는 홈 위치 이외의 곳에 있는 동안 홈 교환국을 거칠 필요 없이 통화를 받을 준비를 하게 된다.

0 핸드폰의 전화 연결

우리가 핸드폰으로 전화를 걸 때에는 다음과 같은 단계를 거치게 된다.

- 번호를 입력해 전화를 건다
 - 전화국에서는 핸드폰의 홈 교환국으로 연결을 하게 되는데, 홈 교환국은 HLR 에게 단말기의 위치를 묻는다. HLR 에서 만일 핸드폰이 바깥에 있을 경우 다른 교환국 ID 번호를 알려 주고, 홈 위치에 있을 경우 바로 연결한다.
 - HLR 은 핸드폰을 찾기 위한 TLDN(임시 지역 디렉토리번호)를 할당해 줄 것을 바깥 교환국에게 요청하게 된다.
 - 바깥 교환국에서는 TLDN 을 HLR 로 보내주게 되고, HLR 은 이 TLDN 번호를 홈 교환국으로 보내 이곳과 연결시킨다.
- TLDN 은 바깥 교환국에서 만드는 새로운 임시 전화번호로 일반 핸드폰 번호와 같이 취급된다. 핸드폰이 위치한 바깥의 교환국에서는 핸드폰 이용자의 TLDN 을 얼마나 오래 보관할 것인지를 결정하기 위해 타이머를 사용하게 된다.
- 이 타이머는 핸드폰 추적을 위해 널널하게 잡히게 된다. 보통 2초동안 이와 같은 추적작업을 거쳐 핸드폰에 전화가 연결되는데, 우리가 핸드폰으로 전화를 걸 때 2초정도 "연결중..."이라는 메시지가 뜨는 것이 바로 이러한 과정을 의미한다.

① 기지국 이동시 통화유지(핸드오버)

걸어가면서 휴대폰을 쓰거나, 차를 타고 고속도로를 질주하며 휴대폰을 쓰게 되는데도 전화 통화는 끊기지 않는다. 서울에서 통화가 시작되었는데 대전에 가면서도 똑같은 곳에 전화를 할 수 있는 이유는 무엇일까? 분명 휴대폰이 연락을 하고 있는 기지국 영역을 벗어나면 끊기는 것이 정상일 텐데 말이다.

움직이는 휴대폰이 연락을 하고 있는 기지국 영역(셀)을 벗어나 다른 기지국 영역(셀)으로 들어가게 될때, 계속해서 통화를 유지하기위해 통화로(기지국-핸드폰 연락통로)를 이동하는 기지국으로 바꾸어 주는것을 '핸드오버(Hand over)'라고 한다. 이 핸드오프는 하드 핸드오프와 소프트 핸드오프로 나뉘는데 기존의 아날로그 방식은 기존의 기지국과의 연락을 끊어버리고 새로운 기지국과 연결하는 하드 핸드오버(Hard Hand-over) 방식을 쓰는 반면, CDMA 방식의 핸드폰은 두개의 기지국과 통화로를 계속해서 유지할 수 있는 특징을 지닌다. 이를 소프트 핸드오버(Soft Hand-over)라고 한다. 바로 이 핸드오버 기술 덕분에 우리는 핸드폰을 이동시키면서도 통화를 유지할수 있는 것이다.

그림을 보면 다음과 같다.

그림 2 기지국이동시 통화유지

내가 가지고 있는 휴대폰이 연락을 하고 있는 기지국에서 점점 멀어지면서 다른 기지국 영역으로 이동하게 되면 기존의 기지국 영역에서 보내는 신호인 '파일럿 채널'을 찾게 되고, 이 파일럿 채널이 두개가 나오면 기존의 통화로를 그대로 유지하면서 새로운 기지국과 통화로를 뚫어 연락을 하게 된다. 즉 두 기지국을 동시에 연결해 동시에 통화를 하게 되고, 기존 기지국이 끊기고 새로운 기지국과는 계속해서 통화로가 유지되면서 움직이면서도 전화를 할 수 있는 것이다.

② 기지국과 멀어지면(전력제어)

핸드폰을 사용할 때 LCD 판을 유심히 보면 안테나 막대기가 있는 것을 알 수 있다. 시내를 돌아다닐 때엔 막대기가 꼭 차있지만, 산속이나 건물 안에서는 막대기가 두세 개만 나온다. 즉 기지국으로부터 도달하는 전파가 약하다는 뜻이다. 하지만 신호가 적다 하더라도 통화가 끊기는 일은 없다. 왜 그럴까?

전파의 특성상 기지국과 핸드폰 사이의 거리가 멀어지면 멀어질수록, 또는 장애물이 생길수록 전파의 힘이 약해져 통화 품질에 손실이 생기게 된다. 핸드폰 단말기의 출력이 일정하다고 가정하면, 기지국에서 100m 떨어져 있는

핸드폰과 1000m 떨어져 있는 핸드폰 사이의 거리 비율이 10배 이므로, 멀리 떨어진 핸드

핸드폰의 구동 원리

폰은 가까이 있는 핸드폰보다 1000분의 1 내지 10만분의 1의 약한 신호를 기지국에 보내게 된다. 이럴 경우 전파의 전력이 약한 만큼 사용할 수 있는 CDMA 용량이 심각하게 줄어들게 되고, 멀리 있는 이동국은 가까이 있는 이동국의 더 많은 CDMA 용량때문에 통화를 간섭받기까지 한다. 이를 근거리/원거리 문제(Near/Far problem)이라고도 한다

그럼 3 기지국과 멀어지면 이를 극복하기 위해서는 기지국에서 수신되는 핸드폰의 수신전력이 일정하도록 거리에 따라 핸드폰의 송신 전력을 조정해야 한다. 즉 핸드폰이 기지국에 비해 멀리 있으면 멀리있을수록 더 센 전력으로 전파를 쏘아 물리적인 거리차이에 따른 전파손실을 해결하는 것이다. 이를 전력제어라고 하는데, 대부분의 무선 전화기는 1초에 800번 전력증감을 체크하게 된다.이를 통해 기지국과 멀어지더라도 통화가 유지될 수 있는 것이다.

OFDM의 기술과 응용 I

I. 서론

무선채널에서 데이터를 고속으로 전송할 경우 다중경로 페이딩(multipath fading), 도플러 확산(Doppler spread) 등의 영향으로 인해 높은 비트 오류율을 갖게 되어 무선채널에 적합한 무선접속방식이 요구된다. 이러한 무선접속방식으로 낮은 출력, 낮은 탐지확률 등의 장점이 있는 대역확산 변조방식이 널리 사용되고 있다. 대역확산 방식은 크게 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식과 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 방식으로 분류할 수 있다. DSSS 방식은 무선 채널에서 발생하는 다중경로 현상을 채널의 경로 다이버시티(path diversity)를 이용하는 Rake 수신기를 사용하여 적극적으로 대처할 수 있는 장점이 있다. DSSS 방식은 10 Mbps의 전송속도까지는 효율적으로 사용될 수 있으나 그 이상의 고속 데이터 전송시 chip 간 간섭이 증가함에 따라 하드웨어 복잡도가 급속히 증가하고, 다중사용자간섭(multi-user interference)에 의해 수용할 수 있는 사용자의 용량에 한계가 있는 것으로 알려져 있다. FHSS 방식은 데이터를 랜덤 시퀀스에 의하여 주파수를 이동하면서 전송하기 때문에 다중채널 간섭 및 협대역 임펄스성 잡음의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 방식에서는 송신단과 수신단 사이의 정확한 동기가 매우 중요한데 고속 데이터 전송시에는 동기 추출이 어렵다는 단점이 있다.

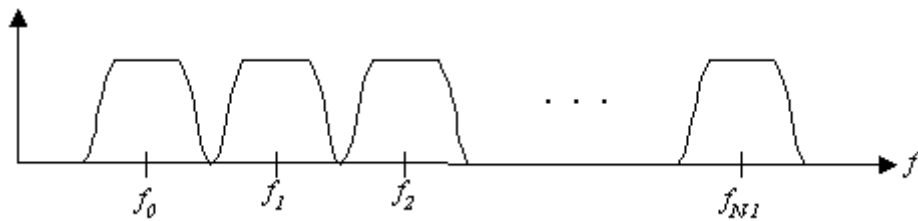
OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 유·무선채널에서 고속 데이터 전송에 적합한 방식으로 최근 활발히 연구되고 있다[1]~[4]. OFDM 방식에서는 상호 직교성을 갖는 복수의 반송파를 사용하므로 주파수 이용효율이 높아지고, 송·수신단에서 이러한 복수의 반송파를 변·복조하는 과정은 각각 IDFT와 DFT를 수행한 것과 같은 결과가 되어 IFFT와 FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있다. 이러한 OFDM 방식의 고속의 데이터 전송에 적합하기 때문에 IEEE 802.11a와 HIPERLAN/2의 고속 무선 LAN, IEEE 802.16의 광대역 무선 액세스(BWA: Broadband Wireless Access), 디지털 오디오 방송(DAB: Digital Audio Broadcasting)과 디지털 지상 텔레비전 방송(DTTB: Digital Terrestrial Television Broadcasting), ADSL과 VDSL의 표준방식으로 채택되었다.

II 장에서는 이러한 OFDM 방식의 기본 이론에 대하여 살펴보고, III 장에서는 OFDM 방식을 사용하는 통신시스템에 대하여 설명한다. IV 장에서는 본 고의 결론을 맺는다.

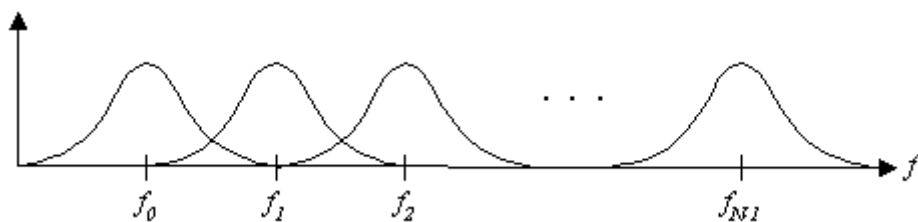
II. OFDM 기본 이론

1. OFDM 개요

OFDM 방식은 여러 개의 반송파를 사용하는 다수반송파 전송의 일종으로 반송파의 수만큼 각 채널에서의 전송주기가 증가하게 된다. 이 경우 광대역 전송시에 나타나는 주파수 선택적 채널이 심볼간 간섭이 없는 주파수 비선택적 채널로 근사화되기 때문에 간단한 단일탭 등화기로 보상이 가능하다[1]~[4]. 이와 관련하여 1966 년에 다채널을 통하여 대역 제한된 신호를 심볼간 간섭 및 채널간 간섭 없이 동시에 전송할 수 있는 원리가 제시되었으며, 그림 1(a)는 이의 전송 스펙트럼을 보여준다[5]. 이 방식에서는 인접 대역을 분리하기 위해 천이특성이 우수한 필터를 사용해야 한다. 이후 채널간 간섭을 방지하기 위한 기저대역 필터와 다수의 발진기 뱅크를 함께 사용하는 직교 다중화 QAM 이 제안되었는데, 그림 1(b)는 이 경우의 전송 스펙트럼을 보여준다. 이 방식에서는 완만한 천이특성을 갖는 필터를 사용하여 대역 제한시키며 대역폭 효율 감소와 채널 왜곡을 방지하기 위해 인접 대역을 직교적으로 중첩시켰다.



(a)

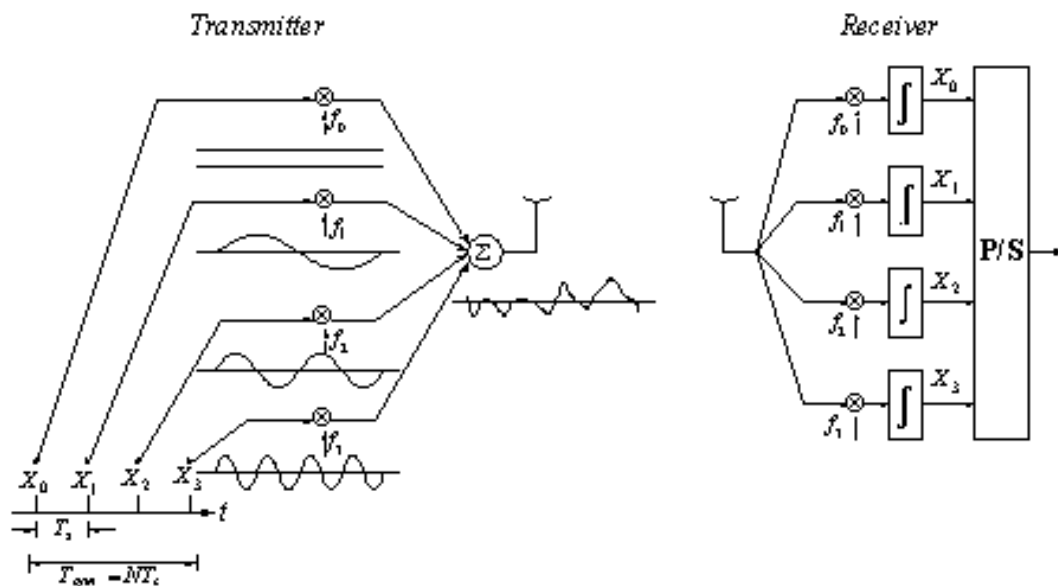


(b)

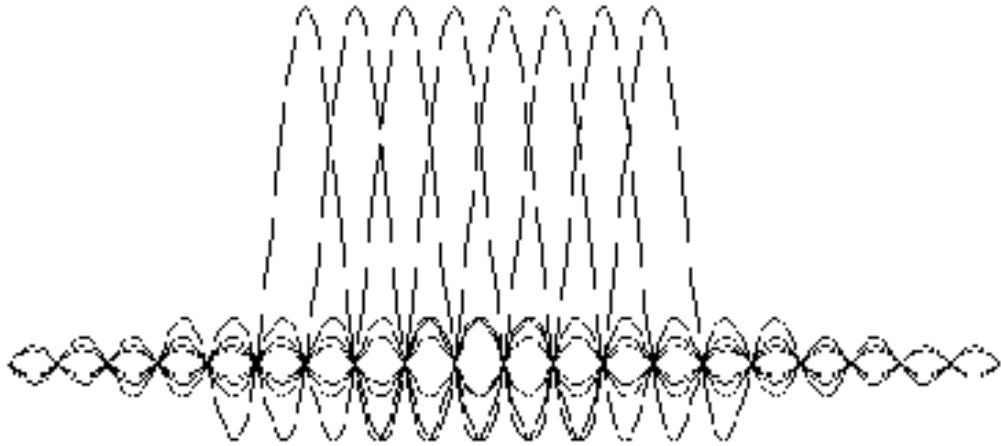
<그림 1. 다수반송파 전송의 스펙트럼 특성>

핸드폰의 구동 원리

그림 2는 이와 같은 대역 제한 필터와 발진기 뱅크에 의한 다수반송파의 기저대역 변복조의 기본 원리를 보여 준다. 이 그림에서 병렬화 된 N 개의 M -ary 데이터 심볼들은 해당 반송파에 의해 변조되고 그 결과가 더해져 하나의 OFDM 심볼을 구성하게 되며 최종적으로 RF 단에 입력되어 채널로 전송된다. 다중경로 채널을 통과해 수신된 신호는 기저대역으로 변환된 후 복조 과정이 수행되는데 이 때 송신 데이터를 정확히 복조하기 위해서는 모든 부반송파가 상호 직교해야 한다. 각 부채널로 전송되는 신호는 시간영역에서 심볼주기 길이의 구형파 윈도우를 곱한 형태이므로 각 부채널에서의 스펙트럼은 sinc 함수로 표현된다. 따라서 인접 부반송파의 간격을 심볼주기 역수의 정수배로 설정하면 모든 부반송파 사이의 직교조건이 만족되어 수신단에서 왜곡 없이 복조할 수 있다. 그림 3은 OFDM 방식의 전송 스펙트럼을 보여주는데 모든 부반송파가 상호 직교함을 알 수 있다. 이와 같은 OFDM 신호의 등가 이산시간 기저대역 신호는 데이터를 IFFT 한 결과와 같으며 수신단에서는 FFT를 수행하여 복조를 이루게 된다



<그림 2. OFDM 전송방식의 개념>



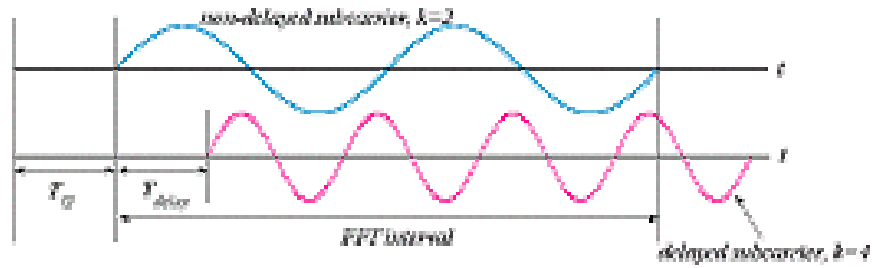
<그림 3. OFDM 방식의 전송 스펙트럼>

2. Cyclic Prefix

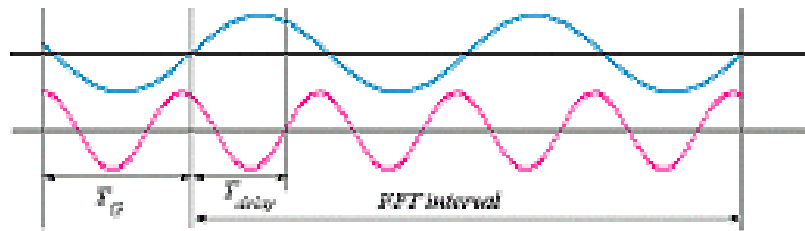
OFDM 심볼의 전송은 심볼단위로 이루어지나 OFDM 심볼이 다중경로 채널을 통해 전송되는 동안 이전 심볼에 의한 영향을 받게 된다. 이러한 OFDM 심볼간 간섭을 방지하기 위해 연속된 심볼 사이에 채널의 최대지연확산보다 긴 보호구간(guard interval)을 삽입한다. OFDM 심볼주기(T_{sym})는 실제 데이터가 전송되는 유효심볼주기(T_{mb})와 보호구간의 합이 되며, 수신단에서는 보호구간을 제거한 후 유효심볼주기 동안의 데이터를 취하여 복조를 수행한다. 보호구간에는 부반송파의 지연에 의해 발생할 수 있는 직교성의 파괴를 방지하기 위해 유효심볼구간에서 마지막 T_{G} 구간의 신호를 복사하여 삽입하게 되며 이를 cyclic prefix(CP)라 한다.

CP의 삽입으로 대역폭 효율은 $T_{\text{mb}}/(T_{\text{mb}} + T_{\text{G}})$ 만큼 감소하게 되며, 유효 심볼구간의 신호대잡음비 손실이 발생한다. CP의 삽입에 의한 신호대잡음비 손실이 1% 이하가 되도록 유효심볼구간의 길이를 설정한다.

핸드폰의 구동 원리



(a) '0' 신호 삽입

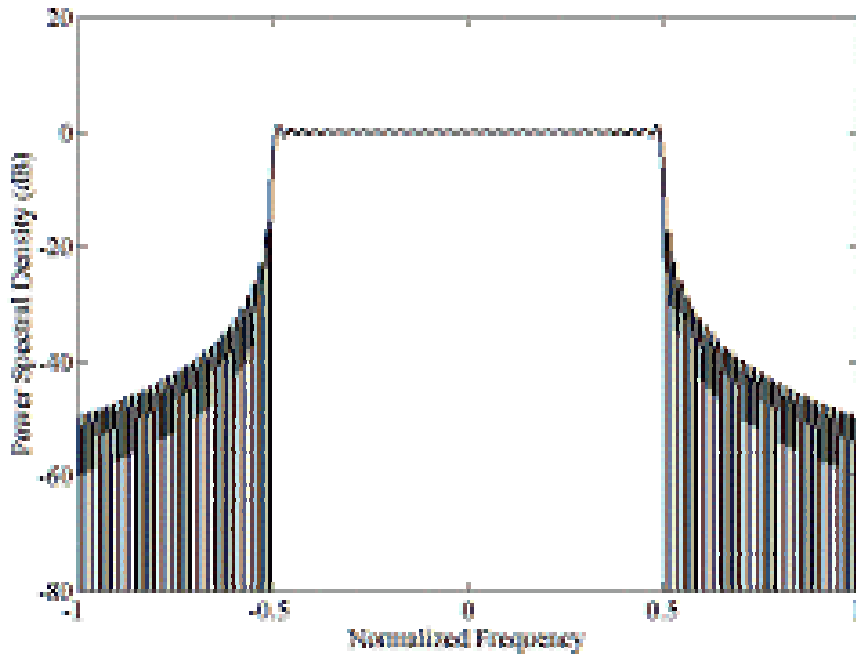


(b) Cyclic prefix의 삽입

<그림 4. 보호구간의 삽입을 위한 두 가지 방식>

3. 인접채널간 간섭

OFDM 방식의 주파수 스펙트럼은 각 부반송파가 갖는 sinc 함수의 합으로 나타나기 때문에 인접 부반송파의 간격이 $1/T_{\text{sub}}$ 의 정수배가 되면 직교성이 유지되지만 sinc 파형은 roll-off 특성이 좋지 못하여 인접 채널에 영향을 주는 인접채널간 간섭(adjacent channel interference)을 발생시킨다. 그림 5는 OFDM 전송 스펙트럼을 나타낸 것인데 전송 대역 밖에 스펙트럼이 상당 부분 존재하여 인접채널간 간섭을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.



<그림 5. OFDM 방식에서의 전송 스펙트럼>

인접채널간 간섭을 감소시키기 위해서는 대역 제한 필터를 사용하여 대역밖의 스펙트럼을 제거시키거나 시간영역에서 올림형 코사인 윈도우(raised cosine window)와 같은 윈도우를 사용하여 대역 밖 스펙트럼의 크기를 감소시킬 수 있다. 이 외에도 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 위해 등화를 수행해야 한다. OFDM 방식에서는 각 부채널이 주파수 비선택적 페이딩 채널로 근사화 되므로 각 부채널에서의 등화기는 단일탭 형태가 되며, 이 때 등화기 계수는 추정된 부채널의 역이 되므로 수신단에서 각 부채널을 추정하는 채널추정이 필요하다. 채널 추정기는 주파수영역에서 최소자승(least square: LS) 또는 최소평균제곱오차(minimum mean-square error: MMSE) 기준을 적용하여 유도할 수 있으며, LS 채널 추정기는 구조가 단순한 반면 채널의 통계적 특성을 이용하지 않으므로 잡음에 민감하다. MMSE 채널추정기는 자기 상관과 상호 상관과 같은 채널의 2 차 모멘트를 이용하므로 계산량이 LS 추정기에

비해 크게 증가하지만 잡음을 고려한 전체 추정 오차가 최소가 되도록 하므로 심한 null 을 갖는 페이딩 채널의 경우 우수한 성능을 나타낸다.

OFDM 방식에서의 채널추정은 채널추정에 사용하는 데이터의 종류에 따라 크게 파일럿 심볼 기반(pilot-symbol-aided: PSA) 채널추정기법과 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 심볼주기의 채널을 추정하므로 고정 또는 시간 상관성이 큰 저속 페이딩 채널에 적합하다.

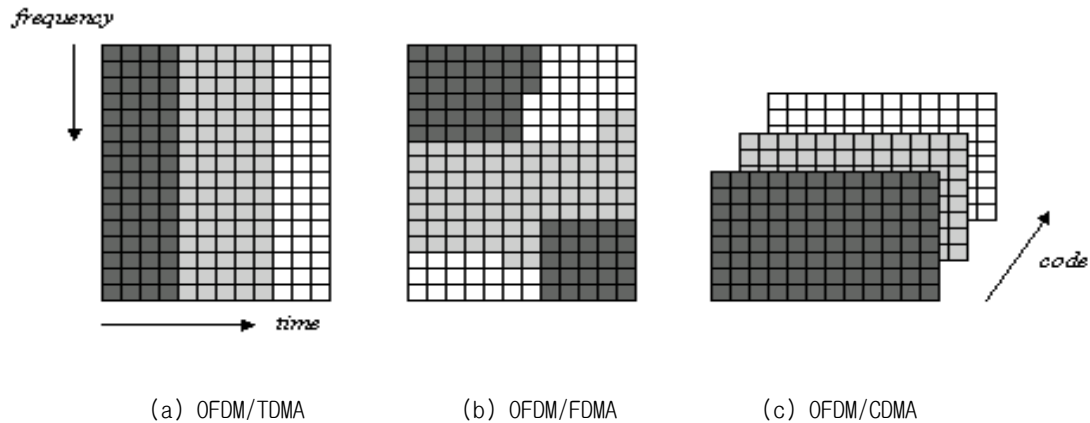
5. Coded OFDM

OFDM 방식을 사용함으로써 다중경로 채널에 의한 심볼간 간섭을 극복할 수 있으나, 특정 부채널의 감쇄가 심한 경우에는 수신 SNR 이 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), LDPC 부호 등을 사용할 수 있다. 또한, 연접오류(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 TDMA, FDMA, CDMA 가 있으며, OFDM 과 이들 다중 액세스 방식을 결합하여 사용한다[6]. OFDM/TDMA 의 경우에는 전체 대역이 N 개의 부채널로 구성되어 있고 각 사용자는 할당된 시간동안 N 개의 부채널을 모두 이용한다. OFDM/FDMA 는 전체 부채널 중에서 일부의 부채널을 이용하여 시간에 제한 받지 않고 이용하는데 부채널의 할당은 사용자의 요구에 따라 동적으로 변할 수 있다.

OFDM/CDMA 는 각 사용자가 고유의 확산부호를 사용하여 모든 시간과 부채널을 이용하는데 확산방식에 따라 MC-CDMA, multicarrier DS-SS-CDMA, MT-CDMA 로 구분할 수 있다[7].



<그림 6. 다중 액세스 방식의 비교>

7. OFDM 방식의 고려 사항

OFDM 방식은 다수의 직교 반송파를 사용하기 때문에 부반송파 사이의 직교성이 파괴되는 경우에는 채널간 간섭이 발생되어 비트 오류율이 크게 저하되는데, OFDM 방식에서 직교성이 파괴되는 원인은 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

첫 번째는 수신단에서 심볼동기와 반송파 주파수 동기가 이루어지지 않은 경우이다. OFDM 시스템에서의 변복조는 IFFT 와 FFT 의 블록단위로 각각 이루어지기 때문에 심볼동기는 OFDM 심볼의 시작점을 찾는 것을 의미한다. 심볼간 간섭과 채널간 간섭 없이 OFDM 심볼을 복조하기 위해서는 FFT 의 시작이 OFDM 심볼의 보호구간내에서 이전 심볼의 영향을 받지 않는 영역에 속해야 한다. 이를 위해 수신 신호로부터 심볼 옵셋을 추정하기 위한 다양한 추정기법들이 연구되어왔다. 반송파 주파수 옵셋이 발생하는 경우에는 부반송파의 직교성이 파괴되어 다른 모든 부반송파의 영향을 받게 되므로 단일 반송파 방식에 비해 심각한 성능 저하를 초래한다. 최근까지 반송파 주파수 동기를 이루기 위한 많은 반송파 주파수 옵셋 추정기법이 제안되었다[8].

두 번째는 채널의 특성이 송수신기의 상대적 이동으로 인해 OFDM 심볼주기 내에서 변하는 경우이며 이 때 수신단에서 각 부반송파의 직교성이 파괴되어 채널간 간섭이 발생하게 된다. 이 경우에는 단일탭 등화기로 보상이 어렵기 때문에 시스템의 성능 저하가 발생된다. 따라서, 이동 환경에서의

시변채널에 의한 채널간 간섭을 감소시키기 위해서는 OFDM 파라미터의 설계시 보호구간과 유효심볼 주기와와 상대적인 비율을 고려하여 OFDM 심볼주기를 허용 한계까지 감소시키거나 채널간 간섭을 추정하여 보상하는 방법을 사용해야 한다[9].

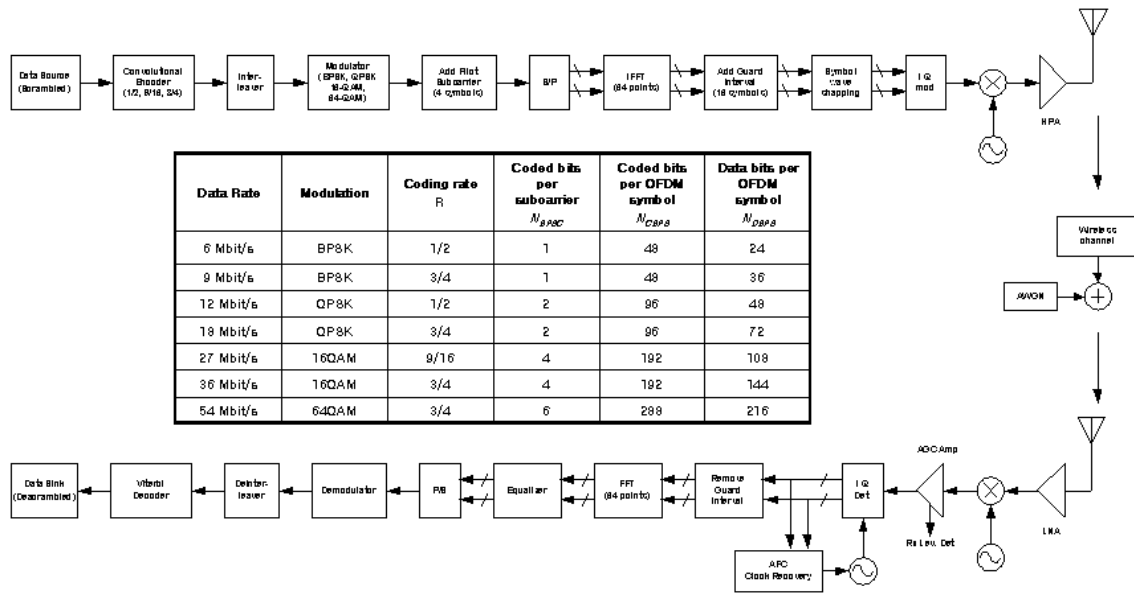
세 번째로 OFDM 방식에서 변조된 신호의 크기는 레일레이 분포를 가지므로 OFDM 심볼의 시간영역 신호는 PAR(peak-to-average ratio)가 단일반송파 방식보다 크게 나타난다. 따라서 고출력 증폭기를 단일반송파 방식과 동일한 효율로 사용할 경우 비선형 왜곡에 의한 채널간 간섭 및 인접채널간 간섭이 OFDM 방식에서 보다 크게 발생하게 된다. 이와 같은 왜곡을 방지하기 위해 OFDM 신호의 PAR를 감소시키거나 필터링 및 사전 보상기 등을 사용하는 방식이 제안되었다[10].

III. OFDM 방식의 통신시스템

1. 무선 LAN

기존의 IEEE 802.11 무선 LAN은 DSSS, FHSS, IR (Infrared) 방식을 사용하여 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific, and Medical)대역에서 2 Mbps의 전송률을 지원하였다 [11]. 그러나 이러한 규격으로는 증가해 가는 높은 전송속도에 대한 요구를 만족시킬 수 없어, 1999년 IEEE 802.11a와 IEEE 802.11b의 새로운 물리계층 표준안이 확정되었다 [12][13]. IEEE 802.11b는 2.4 GHz 대역에서 기존의 DSSS 방식을 확장한 CCK (Complementary Code Keying) 방식을 사용하여 11 Mbps의 전송률을 지원하며 현재 상품화가 되어 널리 보급이 이루어지고 있다. 한편 IEEE 802.11a는 5 GHz 대의 U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 비면허 대역에서 DSSS 방식의 한계를 극복하고 더 높은 전송속도를 얻기 위하여 OFDM 변조방식을 채택하였다. 에러정정을 위하여는 부호율 1/2, 2/3, 3/4의 컨볼루션 부호기와 1/2 비터비 복호기를 사용하며, 부반송파 변조에는 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM을 사용한다. 그림 7에 나타난 바와 같이 채널의 상황에 따라 위의 부호기와 변조기를 조합하여 6~54 Mbps의 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

핸드폰의 구동 원리



<그림 7. IEEE 802.11a 무선 모뎀 블록과 전송률에 따른 파라미터>

또한, 2001년 11월 IEEE 802 회의에서 기존의 2.4 GHz 대에서 고속의 데이터 전송을 위한 IEEE 802.11g의 표준안으로서 Intersil과 Texas Instrument가 공동으로 11b+11a(Extended Rate OFDM) 방식을 mandatory mode로, CCK-OFDM, PBCC 방식을 optional mode로 제안하여 76.3%의 찬성으로 통과되었다. 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 [14]~[16]. 즉, 이더넷 기반에서만 사용되는 IEEE 802.11과는 달리 HIPERLAN/2는 이더넷, IP, UMTS, ATM, IEEE 1394 등의 여러 형태의 core network에 연결하기 위한 convergence layer를 갖는 것이 특징이다. 표 1은 OFDM 방식을 사용한 기존 통신시스템의 주요 파라미터를 보여준다.

항목	무선 LAN (802.11a)	BWA (802.16ab)	DAB (Eureka-147)	DVB-T	ADSL	VDSL	ACIS	W-OFDM
반송파수	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

핸드폰의 구동 원리

샘플링주기 (us)	0.05	0.05 ~ 0.2	0.5	0.13	0.452	0.0283	1.25	0.12
사용대역	5 ~ 6 GHz	5 ~ 6 GHz	VHF ~ UHF	VHF ~ UHF	25 ~ 11040 kHz	40.138 ~ 12 MHz	2 GHz	NA
대역폭 (MHz)	20	5 ~ 20	2.048	9.14MHz	1.1	12	0.8	5
채널코딩	컨볼루션코드 1/2 ~ 3/4	컨볼루션+RS 1/2 ~ 3/4	컨볼루션코드 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)	$2^1 \sim 2^8$ QAM	$2^1 \sim 2^8$ QAM	DQPSK	QPSK
MAC Duplexing	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	셀룰라	셀룰라

<표 1. OFDM 방식의 통신시스템>

2. BWA (Broadband Wireless Access)

인터넷의 급속한 보급과 대용량 멀티미디어 서비스에 대한 요구 증가로 수 km 내의 옥내 또는 중소사업장에 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 Working Group 이 WirelessMAN™ 이라는 이름으로 1999 년 이래 현재까지 활발한 활동을 하고 있다 [17]. IEEE 802.16 에는 4 개의 TG가 존재하는데 이 중 TG3 와

TG4 는 서로 다른 주파수 대역을 위한 무선 인터페이스 표준 802.16a 와 802.16b를 작성함으로써 기존의 802.16 을 확장시키는 작업을 하고 있다. IEEE 802.16a는 2~11 GHz 면허대역에서의 사용을 목적으로 하는 무선인터페이스 표준이며, IEEE 802.16b는 주로 5~6 GHz 대의 비면허 대역에서의 사용을 위한 무선인터페이스 표준이다. TG3 는 초기부터 여러 가지의 물리계층 제안을 두고 크게 OFDM 방식과 SC-FDE (Single Carrier with Frequency Domain Equalization) 방식 사이에 경합을 벌이다가, 결국 2001 년 3 월 OFDM과 SC-FDE 두 변조 방식을 모두 지원하는 것으로 결정하고 draft 작성을 게시하였다. 반면 TG4 는 비면허 대역을 사용하는 만큼 여러 가지 환경에서 유연하게 동작하는 더 융통성 있는 시스템의 구현을 목적으로 하였으며, 처음부터 IEEE 802.11a 의 OFDM 물리계층을 기본으로 하여 WirelessHUMAN™ 표준안을 작성하고 있다. 최근에는 IEEE 802.16a와 IEEE 802.16b가 유사한 부분이 많이 있기 때문에 두 그룹이 통합하여 IEEE 802.16ab라는 통합 문서로 작업을 진행하고 있다. 이 중 WirelessHUMAN™ 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, 20 MHz의 대역폭을 사용하며 지연시간에 따라 64, 256, 2048 의 FFT 크기를 사용하여 여러 가지 환경에 유연하게 대응할 수 있도록 되어 있다. 에러정정을 위하여는 1/2, 2/3, 3/4 의 컨볼루션 부호기와 RS 부호기를 사용하며, 부반송파 변조에는 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM을 부호기로 사용하여 채널의 상황에 따라 가변 전송률을 지원한다. 5 MHz 대역폭의 사용은 선택 사항이며, duplexing 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 ± 6 dB의 신호 전력 레벨을 조정할 수 있다. 한편, 유럽의 ETSI BRAN에서도 위와 비슷한 개념의 HIPERACCESS와 HIPERMAN의 두가지 프로젝트가 진행 중에 있다.

3. Digital Broadcasting

현재 지상파 디지털 라디오 방송 시스템은 크게 유럽식, 미국식, 일본식이 있으며, 모두 OFDM 방식을 채용하고 있다. 유럽의 DAB (Digital Audio Broadcasting) 방식인 EUREKA-147 은 디지털 변조방식으로 지상파에서의 다중 경로 페이딩에 강건한 COFDM 을 사용하며, 1.5 MHz 의 전송 대역폭을 사용하여 단일 송신기로 고품질의 스테레오 프로그램과 테이터를 다중화 시켜 방송할 수 있다 [18]. 이 때 가능한 프로그램 수는 비트율, 오류정정, 테이터 용량 등에 따라 결정된다. 수신은 간단한 협

(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 COFDM 을 사용한다 [19]. 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 심볼주기가 짧아져 이런 현상이 더욱 심해지기 때문에, OFDM 방식을 사용하여 다중 경로의 영향을 극복한다. 또한, OFDM 방식은 SFN 의 구현을 가능하게 하기 때문에 방송용 주파수 스펙트럼의 포화 현상을 극복할 수 있다. 전송모드는 FFT 크기에 따라 8K 모드와 2K 모드로 나뉘어지며, 다시 보호구간의 길이에 따라 4 가지 모드로 나뉘어진다. 8K 모드는 단일 송신기를 사용하는 시스템이나 다수의 고출력 송신기로 SFN 을 구성하기에 적합하다. 8K 모드에서는 6,817 개의 실제 부반송파와 1,375 개의 가상 부반송파를 사용하고, 이 6,817 개의 부반송파에는 117 개의 연속 파일럿과 569 개의 분산 파일럿을 포함한다. 여기서 연속 파일럿은 심볼에 관계없이 항상 규정된 복소 신호를 전송하는 부반송파이고, 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 SFN 을 구성하는 데 적합하고, 1705 개의 실제 부반송파와 343 개의 가상 부반송파로 구성되며, 1705 개의 부반송파에는 45 개의 연속 파일럿과 143 개의 분산 파일럿이 있다. 대역폭은 7.61 MHz 이고 QPSK, 16-QAM, 64-QAM 변조 방식을 지원하여 높은 전송률 (코딩후 4.98 ~ 31.67 Mbps)을 지원한다. 원천 부호화와 multiplexing 된 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 1/2 부터 7/8 까지 5 가지 부호화 율을 지원한다.

4. ADSL/VDSL

기존의 전화선을 이용한 ADSL (Asymmetric DSL)은 DMT (Discrete Multi-Tone) 방식을 사용하여 640 kbps의 upstream과 약 8 Mbps의 downstream 전송속도로 인터넷 접속과 홈쇼핑 등의 비대칭 서비스를 제공한다 [20][21]. 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 ($2^2 \sim 2^{15}$ QAM)를 최적화하는 bit-loading 알고리즘을 사용한다. 이러한 bit-loading 과정을 통해서 각 부반송파마다 최적의 비트수를 할당하여 높은 전송률을 얻을 수 있다. 또한 유선채널에서는 임펄스응답이 매우 긴 특징이 있어 심볼간 간섭을 막기 위해서는 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 예상되어, 최근 고속의 하향 전송속도를 갖는 VDSL (Very-high-rate DSL) 시스템에 대하여 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다 [22][23]. VDSL 방식은 약 12 MHz의 대역폭을 이용하여 가변적인 비대칭성과 함께 52 Mbps까지의 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) 외에, upstream과 downstream 간의 직교성을 유지하여 NEXT (Near and X-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 upstream과 downstream 대역의 할당이 자유로운 유연성을 가지는 장점이 있는 반면, NEXT의 영향을 완전히 제거하기 위해서는 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. 무선 인터넷 셀룰러 통신

AT&T 에서는 가까운 미래에 무선 인터넷 접속의 수요가 급속히 증가할 것으로 예상하여 1998 년에 셀룰러 환경에서 무선 인터넷 서비스를 제공하기 위한 ACIS (Advanced Cellular Internet Service)를 제안하였으며, 2000 년에 이를 개선한 광대역 무선데이터 액세스 방식을 발표하였다 [24][25]. 1998 년에 제안한 ACIS 는 2 GHz 대역의 매크로셀 환경에서 1MHz 의 대역폭을 사용하여 이동 가입자에게 최대 1~2 Mbps 전송률의 인터넷 서비스를 제공하는 것을 목표로 하였다. 2 GHz 대역 매크로셀 환경에서는 지연확산이 약 40 us 까지 이를 수 있기 때문에 단일 반송파 방식을 사용하여 고속에서 전송할 경우 수신단에서 많은 등화기 탭 수와 긴 등화기 훈련시간을 필요로 하게 되므로, ACIS 에서는 이와 같은 다경로 지연확산의 효과를 줄이기 위하여 OFDM 전송 방식을 도입하였다. 또한, 하향링크에서의 link budget 을 개선하기 위하여 Clustered OFDM 방식을 사용한 다중 기지국 전송안테나와 2 개의 안테나를 사용한 수신 다이버시티를 결합하여 약 10dB 의 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 PAR 을 최소화하고, 동시에 RS 부호와 결합하여 부호화 이득을 얻을 수 있다. 마지막으로, ACIS 에서는 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 한번에 한 기지국만이 채널을 할당할 수 있는 staggered 프레임 구조를 사용하였다.

AT&T 에서 2000 년에 제안한 광대역 무선데이터 액세스 방식 역시 셀룰러 환경에서 무선 인터넷 서비스를 제공하기 위하여 ACIS 의 발전된 형태를 취하고 있다 [25]. 이 방식에서는 하향 패킷 데이터 모드에서 약 5 MHz 대역폭의 광대역 OFDM (W-OFDM) 구조를 사용하여 매크로셀 환경에서 2~5 Mbps, 마이크로셀 환경이나 실내 환경에서 약 10 Mbps 의 전송률을 지원한다. 또한, 이 방식에서는 Sony 가 제안한 OFDM 과 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 5 MHz 의 광대역 OFDM 을 사용하므로 충분한 수의 부채널이 확보되어 전송 다이버시티 없이 한 개의 단일 안테나로 필요한 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. AT&T 에서 제안한 이 광대역 OFDM 방식은 OFDM 기반의 물리계층에 DPA (Dynamic Packet Assignment) 기반의 다중액세스 방식을

적용하였으며, 여기에 적응 변조 및 부호화, 스마트 안테나, space-time coding 을 결합하여 여러 환경에서 다양한 비트 전송률을 제공할 수 있도록 하였다. 또한, 이러한 기술을 이용하여 고속의 데이터 서비스를 필요로 하는 large-resource 와 작은 지연시간을 갖는 small-resource 모두를 지원하는 프레임 구조를 제안하였다. Flarion 에서 제안한 flash-OFDM 역시 OFDM 방식에 주파수 호핑을 적용하여 all-IP 망에서 매우 적은 latency 로 고속의 데이터를 전송하는 방식을 제안하였다.

IV. 결 론

본 고에서는 OFDM 방식의 기본 이론과 OFDM 방식을 사용하는 통신시스템에 대하여 살펴보았다. OFDM 방식은 주파수 효율이 높고, 간단한 단일탭 등화기로 고속 전송시 급격히 증가하는 심볼간 간섭의 보상이 가능하며, FFT 를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 고속 데이터 무선 통신을 위한 전송방식으로 채택되어 왔다. 최근에는 순방향에서 요구되는 높은 link budget 또는 채널용량을 향상시키기 위하여 송수신단에 다중 안테나를 사용함으로써 독립적인 페이딩 채널을 다수 개 형성하여 다이버시티 이득과 코딩 이득을 동시에 얻는 시공간 부호화된 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기법과, 기지국에서 빔 포밍을 하여 다른 방향에서 입사되는 co-channel interference 를 감소시키는 스마트 안테나 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 OFDM 을 무선전송기법으로 사용할 경우에는 유선환경인 ADSL 과 VDSL 에서 사용되는 bit-loading 알고리즘과 유사한 기법을 적용하여 주어진 채널에 최적화된 적응변조기법을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 OFDM 전송기법은 유한한 주파수자원을 효율적으로 사용하여 주파수 효율을 증대하고, 인터넷과 같은 고속 데이터 전송에 특히 적합하기 때문에 차세대의 무선전송기법으로 널리 사용될 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] 조용수, 무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초, 대영사, 2001.
- [2] 김재석, 조용수, 조중휘, 이동통신용 모뎀의 VLSI 설계 - CDMA, OFDM, MC-CDMA, 대영사, 2000.
- [3] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, pp. 17-25, Mar. 1990.
- [4] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, pp. 100-109, Feb. 1995.
- [5] R. W. Chang, "Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 46, pp. 1775-1796, Dec. 1966.
- [6] H. Rohling and R. Grunheid, "Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication system," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1365-1369, 1997.