

OFDM을 위한 송수신 시스템

최성진
서울산업대학교 매체공학과 교수

1. 서론

OFDM 시스템은 2개의 주된 부분인 송신기와 수신기를 포함한다. 그림 1에서와 같이 송신기는 인코더, 변조기, 업컨버터로 구성된다.

인코더는 입력 전송 데이터 스트림을 입력으로 취하고 전송 채널에서의 사용을 위해 데이터가 더욱 강건하게 되도록 코드의 처리과정을 실시한다. 이러한 채널 코딩과정들은 원하는 가시청지역, 채널의 간섭 특성, 다른 계획적인 요소등을 고려하면서 데이터 인터리빙, 에러 보호, 정정 코딩방법 등을 포함한다. 변조기는 초래된 코드화된 데이터 스트림을 업컨버터에 적용되도록 44MHz 중간주파수(IF)를 통해 아날로그 확산 스펙트럼 다중반송파 표현으로 변환을 제공한다. 업컨버터는 초래된 OFDM 신호를 할당된 채널로 천이시킨다.

수신기는 RF 동조기, 복조기, 디코더를 포함한다. RF 동조기는 54MHz에서 72MHz까지, 76MHz에서 88MHz까지, 174MHz에서 216MHz까지 그리고 470MHz에서 806MHz까지의 주파수 대역을 동조하고, OFDM 신호를 44MHz 중간주파수(IF) 출력으로 다운-컨버터 한다. 복조

기와 디코더는 변조된 IF 신호를 받아서 복조 및 디멀티플렉싱을 실시하고, 원래의 2진 디지털 데이터 스트림을 재현하기 위해 코드화된 신호를 디인터리브한다.

2. 송신기 서브시스템

그림 2는 OFDM 인코더와 변조기의 서브시스템 블럭도를 나타낸다. QAM Mapper 전단에 나타낸 블럭들은 서브시스템의 인코더 부분을 구성하고, 채널 코딩 부분은 전송을 위한 데이터 스트림을 준비하기 위해 설계된다. 반면에 Mapper를 포함한 이후의 블럭들은 데이터 스트림을 자유공간 상태에 전송하는 변조된 반송파들을 형성하기 위해 사용되는 메카니즘을 구성한다.

(1) 인코더 부분

이 서브시스템은 입력 데이터 스트림을 취하고, 전송 채널에서의 사용을 위해 데이터가 더욱 강건하게 되도록 코드 처리를 실행한다.

이 부분은 다음과 같이 세분화되어진다.

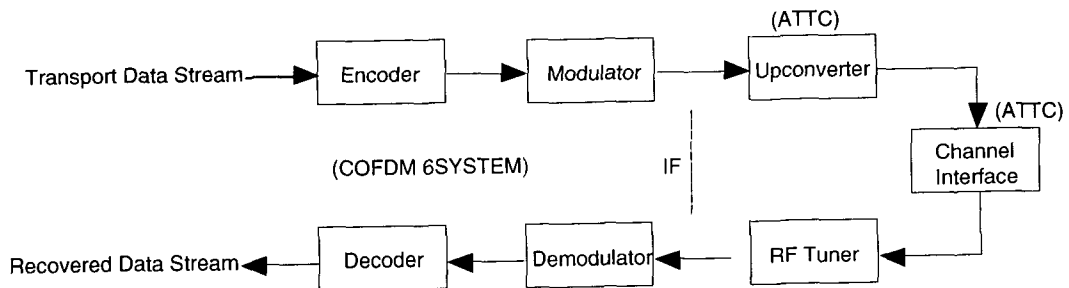


그림 1. OFDM을 위한 전송 서브시스템의 기본 블럭도.

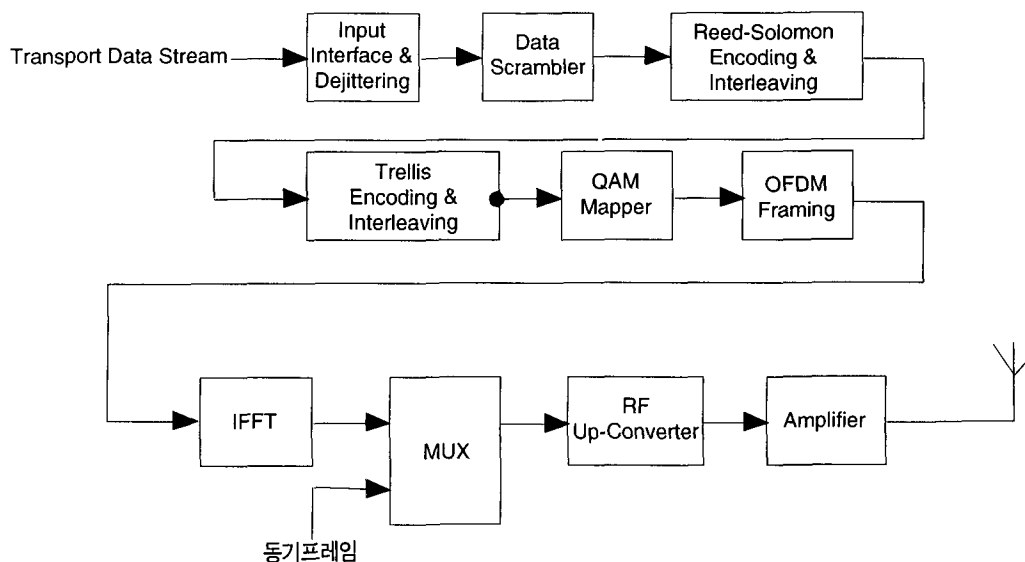


그림 2. 송신기 서브시스템(엔코더와 변조기)

① 입력 인터페이스 및 디지털링(dejittering)

엔코더의 입력은 비트 직렬 포맷의 형태를 이룬다. 입력 인터페이스는 입력 신호들의 명목상의 레벨을 저장한다. 그리고 나서 데이터와 클럭신호들은 병렬 변환기에 직렬로 전달되고, 8비트 병렬 데이터 워드를 생성하기 위해 신호 처리기에 전달된다.

위의 과정 후 FIFO와 게이트 어레이 처리기를 사용하여 입력 클럭의 스펙트럼 정격을 개선하기 위해 디지털링 과정이 적용된다. 이 처리기는 신호가 통과한 디지털망의 앞단계에서 들어오는 신호에 유입되는 지터를 정정한다.

② 데이터 스크램블링

스크램블링 과정의 첫 단계는 디지털된 병렬 스트림을 하나의 직렬 스트림으로 변환하는 것이다. 비트들은 0과 1의 동등 확률을 가짐으로서 에너지 분산을 얻기 위해 추가적인 PRBS(pseudo random binary sequence)에 의해 스크램블된다. 직렬 데이터는 byte-wide 워드로 다시 변환된다. 또한 이 모듈에서 차후의 코딩 처리를 대비한 포맷팅을 위한 신호를 준비하기 위해 프레임 구조 신호들이 생성된다. 스크램블러는 프레임당이나 심볼당 리셋되어야 할 수 있다. 그리고 나서 스크램블된 입력 신호 스트림은 Reed-Solomon 엔코더와 인터리버를 구성하는 외부 에러 정정

코더에 제공되어진다.

③ Reed-Solomon 엔코더와 인터리빙

대부분의 에러 보호 방법들은 인터리빙/스크램블 과정에 의해 지원 받으면서 외부 에러정정 코드와 내부 에러정정 코드라고 불리워지는 2단계 코딩을 사용한다. 첫 번째 단계는 RS-FEC(Reed-Solomon Forward Error Correction)로 알려진 코딩 방법을 기초로한 외부 에러정정을 제공한다. 외부 에러정정 단계는 다른 층의 데이터를 랜덤화 시키는 데이터 인터리버를 포함한다. 이 외부 코드 인터리버는 다른 OFDM 심볼들 간에 정보를 인터리빙한다. 그러므로 이것은 시간 인터리빙으로 간주될 수 있다. 외부 인터리빙 패턴은 하나의 에러에 의해 발생되는 각 Reed-Solomon 코드 워드내의 에러의 양이 코드의 에러정정 용량내에 있도록 선택되어진다.

④ Trellis 엔코딩과 인터리빙

R-S 인터리브된 데이터 스트림은 Trellis(Viterbi) 엔코더에 입력된다. 2/3 FEC 구성이 가능한 가장 높은 코딩 효율을 얻기 위하여 선택되어진다. 내부 인터리버는 반송파들간의 데이터를 스크램블한다. 인터리빙 패턴은 랜덤 발생기에 의해 발생된다. 다중경로 페이딩 조건하에

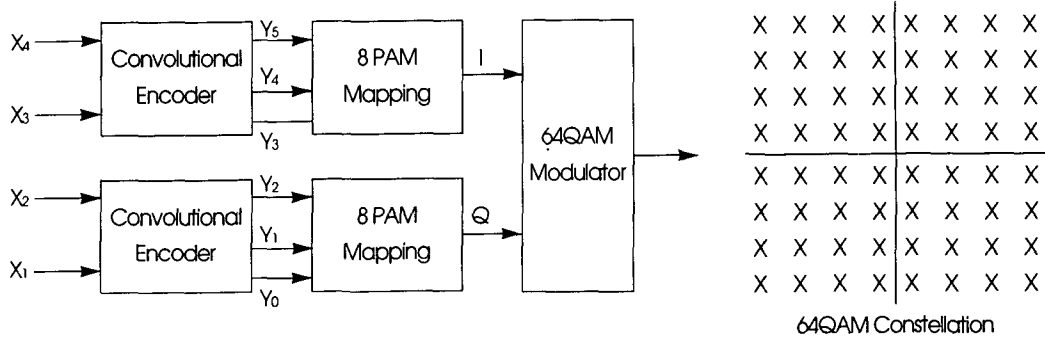


그림 3. 64-QAM Trellis Coding

서 주어진 페이딩 조건을 위한 최적의 인터리빙 패턴은 존재한다. 또한 역으로 주어진 페이딩 조건을 위한 최악의 인터리빙 패턴도 존재한다. 방송의 경우 국부 수신 조건에 따라 다른 페이딩 패턴이 형성되므로 같은 시간에 모든 수신기를 위해 적용될 수 있는 좋은 인터리빙 패턴을 선택하는 것은 불가능하다. 이를 해결하기 위한 방법은 시변(time-varying) 인터리빙 패턴을 사용하는 것이다. 이것은 외부 인터리빙과 결합될 때 다중경로 페이딩 조건내의 서비스에서 간섭을 피하게 하는 성능을 발휘한다.

⑤ QAM 맵핑(mapping)

QAM 맵핑은 실제로 벡터 맵핑이다. 각 프레임에 존재하는 I와 Q 정보는 입력 어드레스로서 사용된다. 이러한 수학적 어드레스의 결과는 디지털 형태로 표현되는 데이터 스트림 신호로서 코드화된 프레임의 진폭과 위상 정보를 나타낸다. 그러므로 TCM 코드는 그림 3과 같이 2개의 uni-dimensional 을 2/3 TCM 코드로 구성되어 있다. 이것은 64 QAM 클러스터를 초래한다.

⑥ 보호구간의 삽입과 동기(Insertion of guard interval and synchronization)

동기 프레임들은 시스템의 임의의 특성들을 결정할 때 수신기를 보조하기 위해 삽입된다. 신호가 정확히 복조되어지기 전에, 수신기는 전송되어진 신호상에서 역 과정의 동작을 수행해야만 한다. 이를 수행하기 위하여 수신기는 다음과 같은 많은 수의 변수와 벡터들을 평가해야 한다.

- FFT 프레임 구조
- 샘플 클럭 타이밍
- 반송파 주파수

- 프레임당 반송파 위상
- 심볼당 반송파 위상

신호들은 전송되는 동안 다중 경로 페이딩과 간섭에 영향을 받는다. 복조기에서, 전송채널상에서의 주파수 응답, 간섭 및 잡음이 복조기의 성능을 최적화하기 위해 평가되어야 한다.

(2) 변조기 부분

① IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)

OFDM 시스템에서, 그림 2에 나타난 블럭도에서 변조기는 그림 4와 같은 형태를 취한다. OFDM 처리과정에서 입력되는 데이터는 사용되는 반송파의 수에 대응하는 신호 벡터의 수 N에 맵핑된다. IFFT는 초래되는 N개의 복소수 상에서 수행되고, 다른 형태의 N' 개의 복소수를 형성한다. N' 개의 복소수 집합은 D/A 변환기를 통해 처리된다. 요구되는 반송파로 업컨버팅하기 위해 실수 성분은 $\cos(t)$ 에 의해 곱해지고, 허수성분은 $\sin(t)$ 에 의해 곱해진다. 이러한 곱들은 채널 OFDM 스펙트럼을 생성하기 위해 합해진다. 데이터 블럭이 변조기내의 FFT에 의해 처리되어질 때, 그 결과는 직렬 포맷으로 피더 아웃되고 보호구간이 더해진다. 초래되는 시간 영역 신호는 완벽한 OFDM 심볼이 된다. 3개의 미리 정의된 동기 심볼들로 구성되는 프리앰블이 규칙적인 간격으로 삽입된다. 이러한 3개의 심볼들을 프리앰블이라 칭한다. 하나의 프리앰블의 시작점에서부터 다음 프리앰블 시작점까지의 심볼들의 블럭을 프레임이라 칭한다.

추가적으로 데이터에 의해서 변조되지 않지만 항상 같은

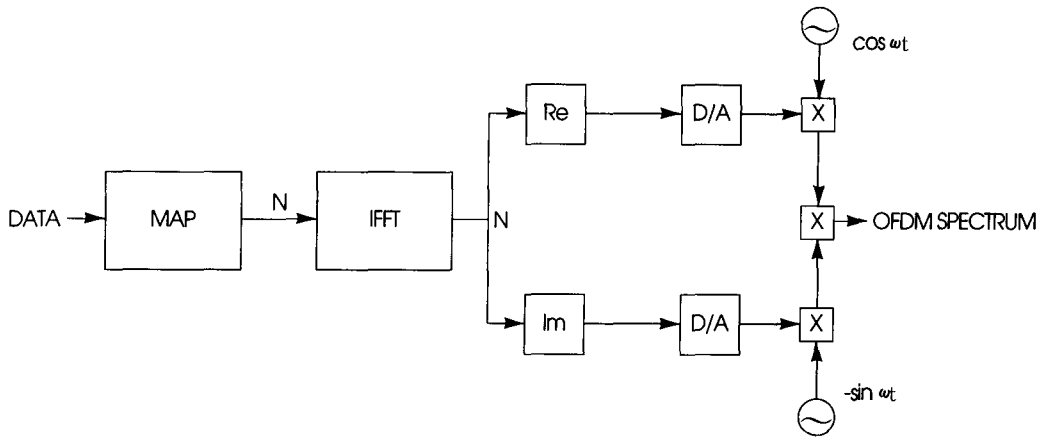


그림 4. OFDM 변조기 블록도

미리 정의된 위상과 진폭을 갖는 파일럿 반송파가 있다. 복조과정은 직접적으로 FFT에 의해 수행된다.

(3) 수신기(Tuner/Demodulator/Decoder)

동조기/디코더(Tuner/Decoder)는 그림 5에서와 같이 4개의 부분으로 나누어질 수 있다. 즉, RF단, pre-FFT 처리, FFT 블록, post-FFT 신호 재현 부분이다. 동조기/디코더(Tuner/Decoder)의 RF 동조기 부분은 54-

72MHz, 76-88MHz, 470-806MHz의 주파수 대역내에서의 채널 선택을 제공하고 수신한다. 그리고 920MHz를 중심으로 하는 첫번째 중간 주파수(IF)를 가지고 변환과정을 통해 수신된 신호를 다운-컨버터 한다. 이것은 국부발진기와 RF 영상신호와 관련되는 문제들을 감소시킨다. 그리고 나서 원래의 OFDM 신호가 44.0MHz를 중심으로 하는 중간주파수로 천이된다. FFT 블록 전에 신호를 기저대역으로 변환시키기 위해 신호는 IF 필터, AGC 증폭기, 복조기를 통과한다. FFT 블록 후에 null 반송파는 무시되고,

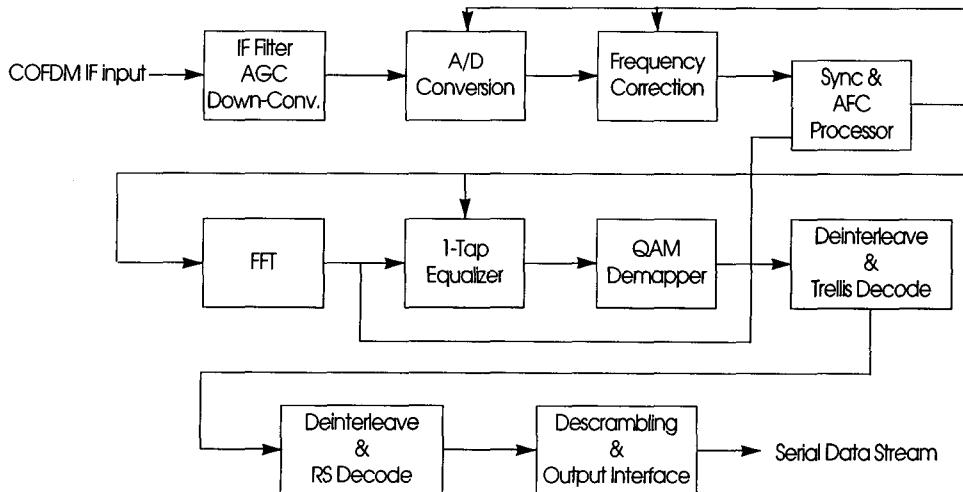


그림 5. 동조기/디코더 블록도

활성 반송파는 등화 처리된다. 그 결과 초래되는 신호는 QAM-demapping 처리된다. QAM-demapper는 주로 메모리내의 look-up table로 구성된다. 등화기로 부터 들어오는 디지털 실수와 허수값은 메모리를 어드레스 하기 위해 사용된다.

3. 제안된 시스템 변수 값

위의 송수신 블럭들을 실제로 구현하기 위해 제안된 두 가지 OFDM 시스템들의 변수들이 표 1, 표 2, 표 3에 나타내었다.

표 1. OFDM 시스템 변수 표

시스템 변수	변 수 값
채널 대역폭	6 MHz
실제로 사용되는 대역폭	5.6 MHz
요구되는 FFT 크기	8 k
유용한 OFDM 심볼 기간	1101.607 μ s
프레임당 심볼 수	105
총 프레임 기간	122.390 ms
보호구간 주기	64.0094 μ s
총 반송파의 수	6169
반송파 간격	0.9078 kHz
기준 파일롯의 수	49
프레임당 기준 심볼의 수	3
모든 반송파들의 클러스터	64 QAM
Trellis 코딩율	2/3
페이로드 데이터율	약 19+Mbps

표 2. OFDM 시스템 변수 2.

시스템 변수	변 수 값
채널 대역폭	6 MHz
실제로 사용되는 대역폭	5.6 MHz
요구되는 FFT 크기	4 k
유용한 OFDM 심볼 기간	555.179 μ s
프레임당 심볼 수	105
총 프레임 기간	60.927 ms
보호구간 주기	25.0752 μ s
총 반송파의 수	3109
반송파 간격	1.8012 kHz
기준 파일롯의 수	49
프레임당 기준 심볼의 수	3
모든 반송파들의 클러스터	64 QAM
Trellis 코딩율	2/3
페이로드 데이터율	약 19+Mbps

표 3. RF 동조기 특성

변 수	값	비 고
주파수대역	54-72 MHz 76-88 MHz 174-216 MHz 470-806 MHz	L-VHF L-VHF H-VHF UHF
채널 대역폭	6 MHz	
중간 주파수	44 MHz	
주파수 안정도(Tx + Rx)	± 20 kHz	0-30 $^{\circ}$ C
위상 잡음	65 dBc @ 1 kHz 105 dBc @ ≥ 10 kHz	
입력 다이내믹 범위	-5 to -68 dBm	
입력 임피던스	50 ohms	
Nominal IF 출력 레벨	-10 to -40 dBm	50 ohms
출력 IF 매칭	1.25 : 1 또는 이상	50 ohm
입력 IF 매칭	1.5 : 1 또는 이상	50 ohms
RF 동조기 잡음 성분	≤ 10 dB	

4. 아날로그 TV 신호전송과 OFDM 신호 전송을 비교하기 위한 필드 실험

본 절에서는 앞절의 내용을 기초로 하여 국내에서 디지털 TV 방송을 하기 위한 제반환경과 기술적 고찰 사항들을 유추하고 국내 방송의 디지털화를 위한 기술 요소들의 개발 방향을 제시하고자, 독일에서 실시된 디지털 TV 방송에 대한 필드 테스트의 결과를 소개한다.

전송채널에서 칼라 TV 신호의 아날로그 전송을 위해 알려진 모든 시스템들은 불완전하고, 눈에 띄일 정도의 화질 왜곡을 발생시킨다. 한편 디지털 신호처리는 현재 사용되고 있는 아날로그 시스템보다 우수한 전송 시스템이라고 알려져 있으나, 결점은 표준안에 따라 샘플링되는 TV 신호의 높은 비트 율에 있다.

따라서 초래되는 대역폭은 표준 TV 채널로 디지털 TV 신호의 직접적인 전송을 불가능하게 한다. 따라서 영상자료의 소스 코딩을 위한 진보된 방법들과 디지털 TV 전송을 위한 OFDM 변조를 이용하여 8MHz 대역의 유럽의 표준 지상파 채널에서 칼라 TV의 디지털 전송을 수행해 보았다. 이러한 필드 테스트의 목적은 실제 전송과 수신 조건 하에서 OFDM 변조된 디지털 TV 신호의 일반적인 특징에 대한 실질적인 결과를 얻기 위해서 이고 또한 디지털적으로 변조된 TV 방송 신호와 잔류측파대(vestigial sideband) 변조된 PAL 신호의 비교가 정상적인 수신 조건과 심각한 수신 조건 상태에서 디지털 변조의 기본적인 잇점을 보이기 위해 UHF 채널에서 수행되었다.

1) 필드 테스트의 기술

필드 테스트를 시행하기 위해 사용된 실험 시스템은 CCIR 601에서 권고한 216Mbit/s의 입력 디지털 TV 신호를 34Mbit/s의 데이터율로 축소된 신호를 이용하였다. 이렇게 압축된 데이터는 효율적인 대역폭 7.5MHz의 전송신호에 의해 OFDM 변조된다. 이러한 신호들은 표준 8MHz의 지상파 UHF TV 채널을 사용하여 전송된다.

OFDM 변조는 2절에서 주어진 식

$$c(kT_A) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i * e^{j2\pi \frac{ik}{N}}$$

과 같이 IDFT(inverse discrete Fourier transformation)의 방법에 의해 이 실험 시스템에서 구현된다. 압축된

디지털 직렬 데이터 스트림은 약 3100 비트의 섹터로 그룹화된다. 직렬-병렬 변환 후, 6 비트로 구성된 데이터 그룹이 전체 블록으로 부터 형성된다. 각 데이터 그룹은 64개의 가능한 값들 중에서 하나의 복소수 값을 나타낸다. 이러한 복소수 값들은 이산 푸리에 계수로서 취급되어지고 IDFT로 처리된다. 초래되는 신호는 시간 이산 OFDM의 변조된 신호이다. 수신 측면에서 복소수 심볼 a_i 를 복원하기 위한 복조 처리과정은 DFT를 사용함으로써 구현될 수 있음이 명백하다. 필드 테스트를 위한 시스템의 기술적 파라미터들이 표 4에 보여진다.

표 4. OFDM 필드 테스트의 기술적 파라미터.

1. 데이터 축소 (data reduction)	간단한 Reed-Solomon 에러 보호를 가진 하이브리드 코딩, 34Mbit/s
2. 변조 원리	OFDM; 512 반송파, 64QAM $T_s = 70.4\mu s$ $\Delta = 8.8\mu s$
3. OFDM 대역폭	7 MHz
4. IF-중간 주파수	35 MHz
5. 전송채널	606 - 614 MHz (채널 38)
6. 송신기 전력	-2 dBW thr, 8 dBW (17 dBW max.)
7. 송신기 지역의 이득	13.5 dB
8. 수신기 지역의 이득	9.5 dB
9. 수신 위치	송신지역에서 12Km 떨어진 지점과 인근 지역

2) 필드 테스트 지역

필드 테스트는 언덕이 많은 구릉 지역과 부분적으로 심각하게 다른 수신 조건을 갖는 지역들에서 실시되었다. 필드 테스트에 사용되는 OFDM 송신기는 WDR TV-송신기가 있는 Langenberg 위치에 설치되었다. 수신은 송신지역과 12Km 떨어져 있는 Wuppertal 대학과 20Km 떨어져 있는 7개의 주변지역에서 특별히 제작된 측정 van을 사용하여 실행되었다. 모든 수신지역에서 OFDM 전송과 PAL 전송의 질적인 측정과 비교가 이루어졌다. 이러한 측정을 위해 디지털 테스터 패턴(zone plate)과 스포츠 중계 프로그램이 이용되었다.

3) 필드 테스트의 결과

송신기로 부터 12Km 떨어져 있는 Wuppertal 대학에서의 정상적인 수신을 위한 측정 결과를 표 5에 나타내었다. 아날로그 PAL 전송을 위해 필요한 최소 요구사항인 필드강도 69dBV/m과 SNR 38dB를 성취하기 위해서는 동기필스내에서 13dBW(20Watt)의 피크 전력이 사용되어야 한다. 그러나 OFDM 전송 시험 결과 표 2에서 알 수 있듯이 송신기 출력전력은 2dBW(1.6Watt)이고 수신신호에서의 SNR은 29dB이었다.

OFDM 전송을 위해 필요한 송신기 최소 전력은 아날로그 PAL 전송을 위해 필요한 최소전력보다 약 10의 몫이 낮았다. 더 나아가 어떠한 에러정정 채널코딩도 시험을 위한 하드웨어에서 수행되지 않았음이 고려되어야 한다.

아날로그 PAL 전송에서는 좋은 영상 품질에서 부터 수용하지 못할 정도의 영상 품질로의 전환이 큰 범위로 감소하는 SNR에 따라 단조적으로 감소하고 있다. 그러나 OFDM 전송에서는 만약 신호대 잡음비가 29dB 이하로 떨어진다면, 이러한 전환은 순간적으로 발생한다.

표 5. 필드 테스트의 결과

편파	전송전력 (dBW)	S/N비 (dB)	에러율 T=5 min.	스포츠 장면의 드롭아웃	테스트패턴의 드롭아웃
H	8	35.5	$5.0 \cdot 10^{-7}$	0	0
V	8	35.5	$4.5 \cdot 10^{-7}$	0	0
H	7	34.5	$6.0 \cdot 10^{-8}$	0	0
H	6	33.5	$1.6 \cdot 10^{-6}$	1	6
H	5	32.5	$1.8 \cdot 10^{-6}$	1	6
V	5	32.0	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0	0
H	2	29.0	$7.0 \cdot 10^{-5}$	7	10
H	-1	25.8	$6.8 \cdot 10^{-4}$	20	no picture
H	-2	-	-	37	no synch

다중경로 수신시 반사(reflection)들이 RF 스펙트럼의 주파수 선택적 페이딩을 초래한다. 그러나 이 반사들은 보호구간의 설정으로 인하여 화질에 부정적인 영향은 미치지 않았다. 이것을 증명하기 위하여 금속판으로 덮여져 있는

건물과 100m 떨어진 거리에서 실험이 수행되었다.

수신된 임펄스 신호들의 분석은 0.9 μ s 지연에서 30% 진폭의 반사를 나타내었다. 이 위치에서 OFDM 전송은 신호대 잡음비 37dB와 7×10^{-5} 의 평균 BER을 갖는 좋은 화질을 생성하였으나, PAL 전송에서는 같은 지연의 경우 단지 9%의 진폭만을 허용하였다.

만약 OFDM 신호가 심각한 다중경로 조건하에서 수신된다면, 주파수 선택적 페이딩은 선택된 OFDM 반송파들을 완전히 삭제함을 초래할 수 있다. 인터레이빙과 적절한 채널 코딩에 의해 초래되는 정보의 손실을 최소화할 수 있었다.

필드 테스트 의해 나타난 더 많은 결과들은 다음과 같다.

1. OFDM 신호는 수직 편파 전송보다 수평 편파 전송시 에러에 덜 민감하다.
2. 만약 PAL 수신기에서 신호대 잡음비가 44dB 이하일 경우, OFDM 신호는 같은 채널에서 전송되는 PAL 신호에 왜곡과 같은 잡음을 유도한다.
3. OFDM 전송에서 화질과 평균 비트에러율의 관계는 분명하지 않다. 좀처럼 발생하지 않는 돌발에러는 증가하는 평균 BER 동안 영상에 전달수 없는 왜곡을 발생시키지 않음이 수행된 시험 결과 나타났다. 만약 개개의 반송파에서의 비트에러율과 시간내의 에러들의 분포가 주어진다면 성취할 수 있는 화질을 위한 더 정확한 규칙들이 주어질 수 있다.
4. OFDM 전송에서 송신기의 선형성이 상당히 중요하다는 것을 시험을 통해 입증되었다. 사용된 송신기 장비는 최대 전력의 20%인 10W의 출력 전력에서 OFDM 반송파들의 직교성을 유지하기 위해 필요로 하는 선형성의 제약하에 사용되었다. 12W 이상의 송신기 출력 전력에서는 비선형 왜곡들이 비트에러율에 영향을 미치었다. 15W 출력 전력에서는 디코더내의 에러정정이 거의 불가능하였다. 순간적으로 비트에러율이 증가함으로써 그 결과 영상의 내용을 더 이상을 볼 수 없었다.

간단한 방법에 의한 OFDM 송신기 신호의 RF 스펙트럼에서는 비선형왜곡이 검출되어질 수 없다. 즉, 스펙트럼 형태로 부터 전송신호의 품질을 위한 어떠한 결론도 유도

할 수 없었다. 그러나 비선형에 의해 야기되어지고 각각의 인접 채널들에서 떨어지는 스펙트럼 성분의 진폭들은 왜곡을 위한 측정 도구로서 사용되어질 수 있다. RF 스펙트럼을 15dBW(31Watt)의 출력 전력과 8dBW(6Watt)보다 작은 출력에서 구해 보면, 어떠한 중요한 스펙트럼 성분들도 인접 채널에서는 발견되어지지 않았다.

그럼에도 불구하고 비선형 왜곡들이 8dBW 이하의 출력 전력에서 완전히 배제되지는 않았다. OFDM 신호의 통계적 성질에 기인하여 전력피크는 전력 증폭기의 선형범위를 초과하여 발생할 수 있다.

참고문헌

1. Yiyang, Wu and Zou, W. Y., "Performance simulation of COFDM for TV broadcast application", SMPTE J., vol. 104, pp. 258-265, 1995.
2. Wu, Y., and Guillet, M., "COFDM for digital ATV terrestrial distribution over 6 MHz channels", IBC 95, 1995.
3. Tew, B. G. and Crawford, D. I., "Design concepts for digital television transmitters.", IBC-95, 1995.
4. Vahlin, A. and Holte, N., "OFDM for broadcasting in presence of analogue co-channel interference.", IEEE Trans. Broadcast, vol. 41, pp. 89-93, 1995.

필자소개



최 성 진

1982. 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1984. 광운대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1991. 광운대학교 전자공학과 졸업(공학박사)
 1987~1992년 인덕전문대학 전자과 조교수
 1992 현재 서울산업대학교 매체공학과 교수
 주관심분야: 영상통신, 디지털 TV방송