

OFDM의 TV 방송에의 응용

김기범

삼성전자 기술총괄 신호처리연구소

1. 서론

Multi-carrier modem은 1950년대 말에 Doelz등에 의하여 최초로 구현되었는데(1) 초기에는 군사용의 고주파 통신과 공공의 교환 망 분야에 응용 되었다. 이후 DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용한 변·복조 처리가 제안된 1970년대 초부터 디지털 기술이 급진전한 1980년대의 중반에 이르기까지 디지털 신호처리를 이용한 multi-carrier 모뎀의 구현을 위한 노력들이 계속 이어져서 많은 발전을 가져 왔다. 디지털 신호처리 상에서 multi-carrier 모뎀을 구현하는 방식은 각각의 채널로 전송될 신호에 대하여 DFT를 수행하고 그 결과를 선로상으로 전송하는 것이다. 이 방법의 사용에 따라 각각의 채널에 대한 펄스 성형 및 주파수 천이를 디지털 신호처리 상에서 할 수 있으므로 구현상의 어려움이 줄어들게 되었다. 또한 디지털 신호처리를 이용하여 multi-carrier 신호의 변·복조를 수행 하므로써 반송파의 갯수를 늘리는 것이 용이하게 되었고 이로 인하여 주파수 이용 효율을 더욱 높일 수 있게 되었다(2, 3). 고속 디지털 전용선 망(High speed Digital Subscriber Loop)의 경우 multi-carrier 신호를 이용한 모뎀의 적용이 매우 유용하며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 중이다. 또한 다중 경로 페이딩이 존재하는 선로를 통한 신호 전송의 경우에는 다중 경로에 의해서 발생하는 신호의 지연 및 시간에 따라 변화하는 감쇄 특성에 의하여 수신 신호에 왜곡이 발생하게 되나, multi-carrier 변조 방식을 이용한 모뎀을 사용함으로써 신호의 왜곡을 줄일 수 있다.

Multi-carrier 방식으로 변조된 신호의 가장 큰 특징중의 하나는 심볼의 주기가 길다는 점이다. 이는 전체의 전송대역을 여러개의 작은 부채널(subchannel)로 분할하여 동시에 병렬로 데이터를 전송하기 때문이며 심볼의 길이는 하

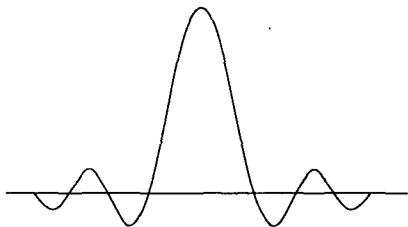
나의 부채널의 대역폭에 반비례하여 길어지게 된다(4). 단일 반송파(single carrier) 변조방식을 디지털 TV 전송과 같은 광대역, 대용량 전송 시스템에 적용할 경우에는 전송 선로에서의 다중 경로에 의한 신호 지연 때문에, 선로 등화기의 tap수가 상당히 많아야만 선로에서의 신호 왜곡을 보상 할 수 있다. multi-carrier 방식을 적용 할 경우에는 신호의 심볼 주기가 단일 반송파 방식과 비교하여 매우 길어지기 때문에 인접한 심볼 프레임간의 간섭이 단일 반송파 방식과 비교하여 매우 작아지게 된다. 또한 multi-carrier 방식에서 심볼 프레임 사이에 간섭을 방지하기 위한 보호구간(guard interval)을 삽입 할 경우에는 입력 신호 프레임 사이의 신호 간섭을 없앨 수도 있게 된다. 더욱이 단일 반송파 방식에서 보호구간을 이용하여 신호 간섭을 없애려 할 경우에는 심볼 주기에 비하여 상당히 긴 시간을 보호구간으로 주어야 하기 때문에 전송 효율의 감소가 매우 커지게 되나, multi-carrier 방식의 경우에는 심볼 주기 자체가 길기 때문에 보호구간의 비율을 심볼 주기에 대하여 상당히 작게 할 수 있으므로 전송효율 감소가 적어진다.

그러나 OFDM 방식을 다중 경로 전송 선로에 적용 할 경우 보호구간의 사용으로 인접한 심볼 간의 간섭을 없앨 수는 있으나, 하나의 심볼 내에서 자기 신호와의 간섭(intrasymbol interference)은 없앨 수가 없다. 이러한 자기 신호와의 간섭은 앞에서 언급 한 바와 같이 DFT를 이용한 신호의 복조 후에 각 부채널 데이터 심볼에서의 왜곡 형태로 나타나게 되고, 특히 데이터 심볼의 왜곡 형태가 신호의 감쇄로 나타나기도 한다. 따라서 신호 감쇄가 심한 부채널로 보내진 데이터 심볼은 작은 크기의 열 가산성 잡음에 대하여도 에러를 발생하게 되어 이에 대한 보상이 반드시 따라야만 한다. 이를 위해 에러를 보상 할 수 있는 채널 부호화 방법이 적용되어야 하는데, 이러한 채널 부호화와 OFDM 방식을 결합하여 OFDM의 장점도 살리면서 보다

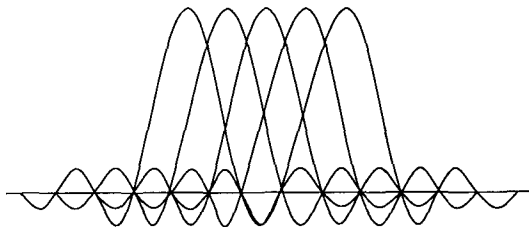
나은 시스템 성능을 얻는 방법을 COFDM(Coded OFDM) 이라고 한다.

2. OFDM의 기초

OFDM 기술은 병렬 데이터, multi-carrier 전송, FFT(fast fourier transform)를 기초로한 블럭 변조와 보호구간 time dispersion등의 원리를 기초로 하고 있다. Multi-carrier 방법은 여러개의 심볼들에 걸쳐 시간 영역의 페이딩을 평균하는 이점을 가지고 있는데, 이것은 페이딩이나 충격 간섭(impulse interference)에 기인한 군집 오류(burst error)들을 효과적으로 랜덤화 하므로 여러 인접 심볼들이 모두 파괴되는 것을 방지하고 단지 약간 왜곡만 되도록 한다. 이것은 채널 대역폭이 여러개의 좁은 부채널로 나뉘어 지고 모든 각각의 부채널에 걸쳐 주파수 응답이 거의 평탄하기 때문에 대부분의 심볼들을 정확하게 재현할 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 따라서 각각의 부채널은 원래 대역폭의 일부분만을 차지하므로 직렬 시스템에 비하여 파형등화가 훨씬 간단해 진다. OFDM의 스펙트럼을 그림1에 나타 내었다.



(a) OFDM subchannel의 스펙트럼



(b) OFDM 스펙트럼

그림 1. OFDM 스펙트럼

OFDM은 각각의 부반송파(subcarrier)가 다른 부반송파들에 대하여 직교성을 유지하도록 반송파의 주파수 간격이 선택된 multi-carrier 변조의 한 형태로 간단히 정의 할 수 있다. 그림2에 FFT에 기초한 OFDM 방식을 지상파 디지털 텔레비전의 전송규격으로 채택하고 있는 유럽 DVB-T(Digital Video Broadcasting-terrestrial)시스템의 송·수신기 블럭도를 나타내었다. 입력 직렬 데이터는 우선 직렬에서 병렬로 변환된후 복소수의 형태로 x 비트씩 묶여진다. 여기에서 숫자 x는 16-레벨, 32-레벨 또는 64-레벨 직각 진폭 변조(16-QAM, 32-QAM 또는 64-QAM)와 같은 신호의 성상도를 결정한다. 복소수들은 역 고속 푸리에 변환(inverse FFT;IFFT)에 의해서 기저대역 형태로 변조되어 전송을 위해 다시 직렬 데이터로 변환된다. 다중 경로(multipath) 왜곡에 의해 발생하는 심볼간섭(intersymbol interference;ISI)을 피하기 위하여 심볼들 사이에 보호구간이 삽입된다. 이산 심볼들은 RF up-conversion을 위해 아날로그로 변환되고, 저역 통과 필터링 된다. 수신기는 송신기의 역과정을 수행하는데 채널 왜곡을 보상하기 위하여 간단한 one-tap 파형등화기가 사용된다. 필터의 tap 계수들은 payload 데이터와 함께 전송되는 훈련열과 파일럿 정보를 기초로 하여 계산된다. 전송 채널에 의해서 발생하는 심볼간 간섭이 없을 경우, 수신기에서는 FFT에 의해서 각각의 부반송파들이 완전하게 분리될 수 있고 부채널들의 직교성이 유지될 수 있다. ISI를 방지하는 하나의 방법은 주기적으로 확장된 보호구간을 삽입하는 것으로서 여기에서 각 OFDM 심볼은 신호 그 자체의 주기적인 확장이 전제 되어야 한다. 전체 OFDM 심볼 구간을 T_{total} 이라 하면

$$T_{total}=T_g+T$$

이다. 여기에서 T_g 는 보호구간이고, T 는 유효 심볼 구간이다. 보호구간이 채널 충격 응답 또는 다중 경로 지연보다 길때 ISI는 제거될 수 있으나, 반송파간 간섭(intercarrier interference ;ICI) 또는 대역내 페이딩등은 남아 있게 된다. 보호구간을 사용하는 경우의 단점으로는 보호구간 기간동안 부가 데이터를 보낼 수 없기 때문에 스펙트럼 효율이 감소한다는 것이다.

따라서 스펙트럼 효율을 증대시키기 위하여 긴 OFDM 심볼 기간이 사용되는데, 이렇게 되면 디지털 텔레비전 전

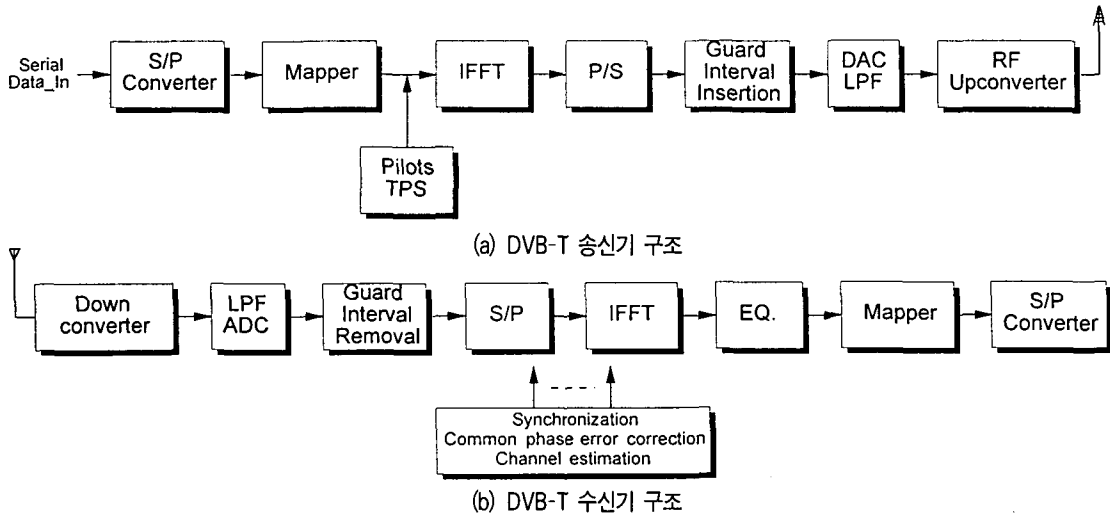


그림 2. DVB-T 송·수신기 구조

송을 위해 큰 수의 FFT가 필요하게 된다.

3. TV 전송 채널에 있어서 OFDM의 장점

첫째, 다중 경로 시간 지연에 대하여 강하다.

TV 신호는 전송대역이 약 6MHz 정도이며, 전송해야 할 전송율은 약 20Mbps 이상이 된다. 약 6MHz 정도의 전송 대역을 차지하는 신호의 심볼 주기는 약 170nsec 정도이며 이러한 심볼 주기로 계산해 볼때 TV 채널의 일반적인 지연 특성은 약 -10~130 심볼 정도로 나타나게 된다. 그리고 이러한 형태의 시간 지연은 수신 신호의 서로 다른 심볼간의 간섭에 의하여 심한 왜곡으로 나타나게 된다. 이에 비하여 OFDM 방식의 경우 6MHz의 전체 대역을 N개의 부채널로 분할하게 되므로 한 심볼의 길이는 약 170nsec의 N배 만큼이 된다. 따라서 N 값이 커지게 되면 채널에 의한 시간 지연에 비교하여 심볼의 주기가 훨씬 길어지게 되므로 채널에 의한 수신 신호의 간섭도 인접한 심볼들 사이에서만 일어나게 된다. 더욱이 심볼과 심볼 사이에 보호구간을 삽입할 경우에는 채널에 의한 전송 지연이 일어난다 할 지라도 인접한 심볼과의 간섭을 피할 수 있게 되므로 인접한 심볼 사이의 간섭에 의한 신호 왜곡을 제거할 수 있다. 이때 보호구간의 길이는 일반적인 경우 전송율과 전송 성능과의 관계를 잘 살펴 보고 적당한 값을 선택하면 된다.

둘째, 간단한 등화기 구조를 갖는다.

단일 반송파 방식의 경우 채널의 전송시간 지연에 의한 지연 시간의 차이가 심볼 단위로 약 130 심볼까지도 가능하기 때문에 이로 인한 신호 왜곡을 보상하기 위한 선로 등화기는 선형 등화기를 사용할 경우 최소한 130tap 이상을 사용해야만 한다. 따라서 신호 왜곡을 보상하기 위한 등화기의 구조가 매우 복잡해지게 되며 계산량 또한 많아지게 된다. OFDM 방식에서는 심볼사이의 간섭이 인접한 심볼에서만 일어날 뿐만이 아니라 이러한 간섭 조차도 보호구간의 사용으로 제거할 수 있으므로 신호 왜곡에 대한 보상도 한 심볼 내의 간섭에 의한 영향만을 제거하면 된다. 따라서 신호 왜곡 보상을 위한 등화기의 구조도 간단해 질 수 있는데 실제로 각각의 부채널에 대하여 한개씩의 tap을 갖는 등화기 구조로서 신호 왜곡을 보상할 수 있다. 이 경우 전체 부채널에 대한 등화기의 전체 tap수는 부채널의 개수 만큼이 되므로 작은 수라고는 할 수 없으나, 각각이 한번씩의 연산만 하면 되므로 단일 반송파 방식의 등화기에 비하여 계산량이 훨씬 줄어들 뿐만이 아니라 구조 또한 매우 간단해 진다.

셋째, 높은 주파수 이용 효율

인접한 부채널들 사이의 스펙트럼이 겹치면서도 수신기에서의 분리가 가능하다는 점 때문에 주파수 이용 효율이 매우 높다 할 수 있다.

넷째, 전송율에 쉽게 변화를 줄 수 있다.

OFDM 방식의 경우 분할된 부채널들을 모두 데이터 전

송에 사용할 경우가 최대 전송율이 되며, 각각의 부채널을 사용하지 않을 때마다 전송율이 약간씩 줄어들게 된다. 이것은 단일 반송파 방식에 있어서는 쉽게 얻을 수 없는 장점으로로서 상황에 따라 전송 데이터량을 자유롭게 조절할 수 있다는 의미도 된다.

다섯째, 기존 NTSC 방식과 동시 전송이 가능

이점은 단일 반송파 방식에 있어서도 마찬가지 이겠지만, NTSC 방식의 TV 신호와 OFDM 방식의 TV 신호가 동시에 서비스 되고 있다면 OFDM 방식의 수신기에는 NTSC 신호에 의한 신호 간섭이 일어나게 된다. 이러한 신호 간섭은 특정 주파수대의 부채널들에 대한 심볼 간섭으로 나타나며, 그 이외의 부채널들에 대한 영향은 미미하게 된다. 왜냐하면 NTSC 신호로부터 OFDM 신호로 들어오는 간섭 신호의 주 요인은 NTSC 신호의 반송파 성분에 의한 것이기 때문이다. 따라서 OFDM 신호를 복조했을 때 NTSC 신호에 의해서 간섭을 받은 부채널의 심볼들은 복구할 수 없는 여러 상황에 빠지게 된다. 이를 피하기 위해서는 NTSC 신호의 반송파 주파수 부분에 해당되는 부채널을 사용하지 않는 방법을 사용하면 된다. 이러한 방식으로 NTSC 신호로부터의 간섭을 피할 경우 NTSC 서비스가 중단된 후에는 이 부분의 부채널들을 심볼 전송에 이용할 수 있으므로 전송량의 증가를 가져올 수 있다.

이러한 것들 이외에도 이동체 수신이 가능하다는 것과 단일 주파수 망(single frequency network; SFN) 구성이 가능하다는 것 등이 TV 전송 채널에서의 OFDM의 장점이 라고 할 수 있다.

4. COFDM의 요소 기술

COFDM 시스템은 유효 심볼 구간, 반송파 수, 변조 방식과 채널 코딩 등 몇개의 요소 기술로서 정의 될 수 있다. 유효 심볼 구간은 반송파 간격과 부호화 시간에 영향을 주며, 데이터 전송량을 유지하기 위해서는 더욱더 긴 유효 심볼 구간이 사용되어야만 하는데 그렇게 되면 반송파의 수와 FFT 규모가 커지는 결과를 초래한다. 실질적으로 반송파 에러와 위상 안정성은 두개의 반송파가 얼마나 가깝게 놓일 수 있는가에 영향을 준다. 만약 이동 수신에 적용 할 경우 반송파간 간격이 충분히 넓다면 도플러 효과는 무시 해도 좋다. 일반적으로 유효 심볼 구간은 한 심볼의 구간

동안 채널이 불변하도록 선택되며 채널 대역폭과 유효 심볼 구간이 정해지고 난후, 반송파의 수가 결정될 수 있다. 반송파들은 유효 심볼 간격에 반비례하여 위치하게 되고 반송파의 수는 FFT에서 처리되는 복소점의 수에 상응한다. HDTV에 있어서 요구되는 데이터율과 보호구간에 대응하기 위해서는 반송파의 수가 쉽게 수천에 도달한다. OFDM 시스템에서 사용되는 변조 방식은 전력 또는 스펙트럼 효율을 기초로 하여 선택되고, 일반적으로 각각의 부 반송파에 적용되는 변조 형태는 전송율과 시스템에서 요구되는 robustness 를 고려하여 적당히 선택한다. OFDM은 주파수 선택적 채널에 있어서 시간과 주파수 다양성을 이용하므로써 데이터를 전송할 수 있는데 페이딩 그 자체를 억압하지는 못할 뿐만이 아니라 각각의 부채널들 자체가 페이딩에 의해서 영향을 받을 수 있다. 따라서 이러한 것을 해결하기 위하여 채널 코딩의 사용이 필요하게 된다. 채널 코딩 기술들 중에서 특별히 페이딩 채널을 위해서는 주파수와 시간 interleaving이 조합된 TCM(trellis-coded modulation)이 가장 효과적이라 할 수 있다. TCM은 신호의 대역폭에 영향을 주지 않고 높은 부호화 이득을 얻기 위한 하나의 과정보로서 부호화와 변조를 조합한 것이다. TCM 부호화기에 있어서 nbits의 각 심볼은 set-partitioning 규칙을 이용하여 n+1 bits의 성상도로 배치되는데 이러한 처리는 대역폭의 증가 없이 단지 성상도의 크기만을 증가 시킨다. TCM 부호는 수신된 신호의 soft-decision 성질을 이용하는 soft-decision Viterbi 복호 알고리즘을 이용하여 복호화 될 수 있다. Gaussian 채널에 있어서 2차원적 TCM 부호에 대한 부호화 이득은 $1E-5$ BER(bit error rate)에 대해 약 3dB이다. 백색 잡음하에서 비록 trellis 부호가 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio; SNR) 임계값을 향상시키지만 충격 잡음이나 군집 잡음 상황에서는 효과가 좋지 않다. 이러한 문제점을 interleaving을 이용하여 해결할 수 있는데 interleaving은 군집 간섭 또는 페이딩을 백색 잡음화 시키므로써 복호기의 에러정정 능력을 배가시키는 채널 코딩에 있어서는 필수적인 기술이다. 반송파 변조와 채널 부호화 매개 변수들은 BER 성능과 스펙트럼 효율 사이의 관계를 고려하여 적당히 선택할 수 있다.

5. 맺음말

본 논문에서는 디지털 TV의 전송 방식으로서 multi-carrier를 사용하는 OFDM의 적용에 대하여 살펴보았다. 이상에서 살펴본 바와 같이 OFDM 기술을 TV 방송에 적용한다는 것은 기술적인 면에서나 실용화면에 있어서 많은 이점을 가지고 있음을 알 수 있다.

현재 연구개발 되고 있는 디지털 고해상도 TV(digital High Definition TV;HDTV)를 포함한 지상파 디지털 TV(terrestrial digital television)의 전송 규격은 크게 단일 반송파를 이용하는 방식과 multi-carrier를 이용하는 방식으로 나눌 수 있다. 단일 반송파를 이용한 방식으로는 QAM(quadrature amplitude modulation)과 VSB(vestigial sideband) 방식이, multi-carrier 를 이용한 방식으로는 OFDM이 연구되어 오고 있다. 미국은 이미 단일 반송파를 이용한 VSB 방식을 Grand Alliance(GA) 디지털 TV 전송 표준 규격으로 확정한 상태이며, 개략적인 방송일정 수립등 방송 환경 조성을 추진하고 있는 상황이다. 한편 multi-carrier를 이용한 COFDM 방식 또한 유럽의 지상파 디지털 TV 전송규격인 DVB-T(digital video broadcasting-terrestrial)에서 표준 규격으로 채택된 상태이며, 영국을 필두로 스페인, 북유럽 등에서 실제 방송을 계획하고 있다. 더욱이 이러한 방송계획에 맞추어 틈손을 비롯한 몇몇 업체는 공동 프로젝트로서 수신기용 반도체 칩의 개발을 활발히 진행하고 있으며, 특히 그동안 OFDM 구현의 최대 걸림돌이었던 FFT는 최근 VLSI 기술의 비약적인 발전에 따라 실용화 단계에 이르렀다(6). 그 외 일본 및 중국에서도 지상파 디지털 TV 전송 규격으로서 OFDM 방식의 사용을 적극 검토하고 있는 상황이다.

따라서 우리나라에서도 최근에 지상파 방송의 디지털화에 대한 중·장기 계획이 수립되고 있는 상황에서 다중 경로 왜곡이 외국에 비해 심한 지역적 특성, 여러 가지 방송 환경, 현재 방송되고 있는 디지털 무궁화 위성 방송과의 기

술적 호환성, 타 매체와의 정합성, 향후 기술의 발전성과 활용성등을 고려할 때 OFDM에 대한 검토가 적극적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- (1) M. L. Doelz et al., "Binary data transmission techniques for linear systems", Proc. IRE vol.45, pp.656-661, May 1957.
- (2) S. B. Weinstein, P. M. Ebert, "Data transmission by FDM using the DFT", IEEE Trans. Commun., vol. COM-19, No. 5, pp.628-634, Oct. 1971.
- (3) B. Hirosaki, "A maximum likelihood receiver for an orthogonally multiplexed QAM system", IEEE JSAC, vol. SAC-2, No. 5, Sep. 1981.
- (4) B. L. Floch et al., "Digital sound broadcasting to mobile receiver", IEEE trans. Consumer Electronics, vol. 35, No. 3, pp.493-503, Aug. 1989.
- (5) By Yiyuan Wu, William Y. Zou, "Performance simulation of COFDM for TV Broadcast Application", SMPTE Journal, pp.258-265, May 1995.
- (6) F. Scalise et al., "A prototype VLSI solution for digital terrestrial TV receivers conforming to the DVB-T standard", International Workshop on HDTV '96

필자소개

김 기 범

1962년 5월 2일생

1981. 3~1985. 2. 한양대학교 전자공학과(공학사)

1985. 2~현재 삼성전자(주) 기술총괄 신호처리연구소 선임연구원

주관심분야 : Digital TV, HDTV, 디지털 통신, Ghost Canceller