

## 비선택성 레일리 페이딩 채널 환경에서 디지털 M/W 전송 시스템의 전력 스펙트럼 성능 분석

박기식\*

### Power Spectrum Performance Analysis of Digital M/W Transmission System in Non-Selective Rayleigh Fading Channel

Ki-Sik Park\*

#### 요약

본 논문에서는 디지털 M/W 전송 채널을 비선택성 레일리 페이딩 채널로 모델링하고 직교 주파수 분할 다중화 (OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 적용한 디지털 M/W 전송 시스템의 전력 스펙트럼 크기를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 성능 분석 결과, AWGN 환경에서는 고정된 대역폭 내에서 전력 스펙트럼 크기에 큰 널링(nulling)이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 비선택성 레일리 페이딩 채널 환경에서는 AWGN 환경보다 전력 스펙트럼 크기가 상대적으로 작아짐을 알 수 있었고, 게다가 반송파 주파수와 이동 차량 속도가 높아지면(도플러 주파수가 커지면) 전력 스펙트럼 크기가 더욱 더 작아짐을 알 수 있었다.

▶ Keyword : 디지털 M/W 전송, 직교 주파수 분할 다중화, 전력 스펙트럼, 레일리 페이딩

#### Abstract

In this paper, we modeled digital M/W transmission channel by frequency non-selective fading channel and analyzed the power spectrum magnitude of digital M/W transmission systems adopting OFDM modulation scheme through simulation. From the simulation results, it was found that deep null does not appear in the specified fixed bandwidth under the AWGN environment.

• 제1저자 : 박기식 • 교신저자 : 박기식

• 투고일 : 2011. 08. 25, 심사일 : 2011. 09. 09, 게재확정일 : 2011. 09. 23.

\* 인하공업전문대학 정보통신과(Dept. of Information and Communication, Inha Technical College)

※ 본 연구는 2009년도 인하공업전문대학 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Also, lower power spectrum magnitude was shown in frequency non-selective fading channel than that in AWGN channel. Furthermore, the power spectrum magnitude value became more lowered when carrier frequency and vehicle speed became higher.

▶ Keyword : Digital M/W Transmission, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Power Spectrum, Rayleigh Fading

## I. 서론

최근 ITU-R에서는 급속히 늘어나는 이동통신에 대한 소비자 욕구를 충족시키기 위하여 하위 대역인 3-6GHz 범위에 대하여 차세대 이동통신, 초고속 무선 LAN(RLAN ; Radio Local Area Networks), 지능형 교통안전 시스템(ITS ; Intelligent Transportation System), 공공안전 및 조난구호(PPDR ; Public Protection & Disaster Relief) 등의 용도로 이미 분배하였거나 분배를 검토하고 있다[1,2]. 그리고 국내의 경우, 이동통신의 활성화에 따라 기지국 전용회선용 주파수 수요가 증가되고 있으며, 일부 지역은 주파수 부족으로 더 이상의 망 구축이 어려운 상황에 도달하고 있다. 또한 앞으로 새로운 이동통신 주파수 대역으로 전파전파 특성상 6GHz 이하 대역이 부각되고 있고 지상파 디지털 TV 방송의 전환, ITS, 그리고 차세대 무선 LAN 도입 등으로 기존의 서비스 채널을 재배치하는 것이 필수적이므로 향후 3-6GHz의 M/W 주파수 대역은 국가 무선통신망 진화에 있어 핵심자원으로 등장하고 있다. 따라서 3-11GHz 대역에 밀집 운용되고 있는 M/W 중계용 주파수 대역은 중장기적으로 6-30GHz 대역 범위로의 확장 이용이 요구되고 있으며, 기존 장거리 구간에서 이용되는 국가 기간통신망이나 방송중계망은 6-13GHz 범위에서, 비교적 단거리 구간에 해당되는 이동통신 기지국 전용회선의 경우 18GHz 이상 대역의 이용이 가시화되고 있다. 또한, 정부의 중장기 M/W 주파수 이용계획에 따라 3~6GHz 주파수 대역의 확보가 시급한 과제로 등장하고 있고, 디지털 TV 방송이 실시되면서 서비스 품질 및 주파수 효율성 제고를 위해서 방송주예(ST, TTL, TSL, FPU) 링크의 디지털화가 가속화되고 있기 때문에 이에 따른 주파수 할당 및 재배치가 요구되고 있는 실정이다[3-5].

최근 디지털 전송방식 시대의 도래에 따라 국내에서도 이동 및 고정 방송 중계를 포함한 M/W 대역의 디지털 전송 방식의 사용이 예상되고 있으며, 이의 효율적인 사용과 6GHz 이하 대역 채널의 원활한 이전을 실행하기 위해서는 6GHz 이상 대역에 도입될 디지털 고정 통신 시스템에 대한 전송 방식 기준이 반드시 제시되어야 한다. 또한 디지털 전송 시스템

의 주파수 이용에 대한 고효율 기술 기준을 수립하기 위해서는 고변조 디지털 통신망의 전력 스펙트럼 밀도에 관한 연구가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 디지털 M/W 전송 채널을 비선형성 레일리 페이딩 채널로 모델링하고 직교 주파수 분할 다중화(OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 적용한 디지털 M/W 전송 시스템의 전송 특성과 전력 스펙트럼 크기를 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

## II. OFDM 방식을 적용한 디지털 M/W 전송 시스템

### 1. 국내외 M/W 대역 주파수 현황

현재 세계 각국은 자국의 무선통신 산업기술의 발전 및 국제 경쟁력 강화를 위하여 각종 신규 디지털 전송방식을 도입하고 있으며, 관련 기술을 선도하는 기반이 되는 전파 자원의 개발에 박차를 가하고 있다. 신규 디지털 통신망에 요구되는 전파 자원의 적기 공급 유무가 관련 시스템 조기 개발 및 상용화의 관건임을 감안하여 해외에서도 국내와 유사하게 상대적으로 이용 수요가 떨어지고 있는 광대역 전송용 보다는 다양한 매체를 전송할 수 있는 중소 용량급 채널 배치방법에 중점을 두고 연구하고 있다. 이러한 연구를 위해 장치 제한 중 출력, 안테나 이득, 변조방식, 필터의 제한 등 여러 요소들을 검토할 필요가 있다. 특히, 장치별로 사용 중인 변조 방식은 변조 효율을 결정하고 채널 대역폭을 결정하는 요소이므로 중요한 파라미터가 된다. 또한 국내 주파수 자원이 날로 부족해지고 있는 현실을 감안할 때 신규 디지털 통신 서비스에 대한 M/W 주파수 자원의 이용을 극대화하기 위해 위와 같은 파라미터를 고려한 최적 채널 배치 방법에 관한 연구가 요구되고 있다. 그러므로 특정 대역에 밀집 운용되고 있는 지상고정업무용 대역의 균형적인 활용을 도모하고, 지상 고정통신망이 가까운 근래에 도입될 미래이동통신망의 근간으로 사용되기 위해서는 M/W 대역의 다양한 채널배치 기준 연구가 선행되어야 한다[3-5].

앞으로의 통신시스템은 갈수록 증가하는 통신 수요를 만족시키기 위해 많은 연구가 선행되어야 하고, 또한 디지털 M/W 통신의 경우에도 사용자가 늘어남에 따라 향후 새로운 통신망 시스템이 제기될 것으로 예상된다. 그러나 개발을 앞둔 시점에서 반드시 필요한 새로운 대역에서의 최적 채널 배치 방법 및 효율적인 전송방식에 관한 기준이 확실히 정립되어 있지 않은 상황이다. 이는 향후 디지털 M/W 통신망의 주파수 재배치 시 전송효율의 저하와 타 통신시스템과의 간섭 영향 등 상당한 피해를 안겨다 줄 것으로 예상된다.

그림 1은 M/W 주파수 대역 할당을 나타낸 것이다. 특히, 3~6GHz 대역은 현재 장거리 M/W 중계용 주파수로 중요하게 이용되고 있는데 주파수 자원이 날로 부족해지고 있는 현실을 감안할 때 이를 다른 대역으로 적절하게 재배치하는 여부가 향후 M/W 대역의 이용에 중요한 이슈로 등장하고 있다.

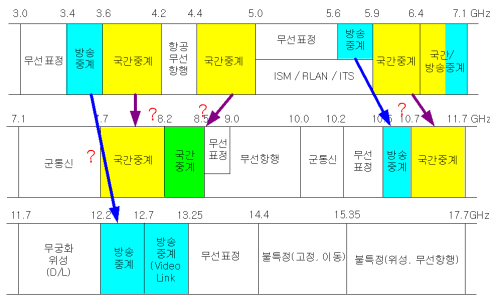


그림 1. M/W 주파수 대역 할당  
Fig. 1. Allocation of M/W Frequency Band

2. 디지털 M/W 전송 시스템 개요

그림 2와 같이 전송로 부호화는 OFDM 세그먼트를 단위로 이루어지므로 하나의 텔레비전 채널 중에서 일부를 고정수신 서비스, 나머지를 이동체 수신 서비스로 하는 것이 가능하며 이와 같은 전송을 계층전송이라고 한다. 각 계층은 하나 혹은 복수의 OFDM 세그먼트로 구성되고, 계층마다 캐리어 변조방식, 내부호 부호화율 및 시간 인터리브 길이 등의 파라미터를 설정할 수 있으며 계층 수는 최대 3레벨까지 가능하다. 각 계층의 세그먼트 수와 전송로 부호화 파라미터는 편성 정보에 따라 결정되며, 수신기의 동작을 보조하는 제어정보는 TMCC (Transmission Multiplexing Configuration Control) 신호에 의해 전송된다[6-8].

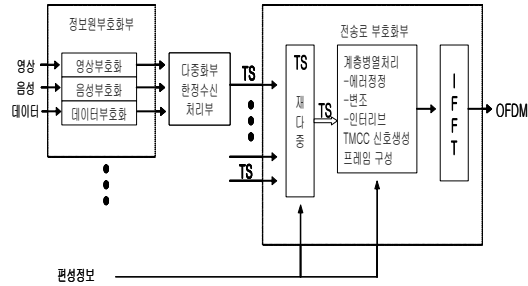


그림 2. M/W 전송 시스템 구조  
Fig. 2. Structure of M/W Transmission System

3. 전송로 부호화 방식

MPEG-2 시스템에서 규정한 TSP (Transport Stream Packet)를 복수 개 포함한 데이터 그룹(이하 데이터 세그먼트)을 기본 단위로 구성하여 전송로 부호화를 시행한다. 데이터 세그먼트는 OFDM 프레임부에서 파일럿 신호가 부가되어 OFDM 블록(이하 OFDM 세그먼트)이 된다. 총 13개의 OFDM 세그먼트는 IFFT에 의해 일괄적으로 OFDM 송신신호로 변환된다[6-8].

본 전송로 부호화 방식에서는 전송 파라미터가 서로 다른 복수 계층을 동시에 전송하는 계층전송이 가능하다. 각 계층은 하나 혹은 복수의 OFDM 세그먼트에 의해 구성되고, 계층마다 캐리어 변조방식, 내부호의 부호화율 및 시간 인터리브 길이 등의 파라미터를 설정할 수 있다. 또한 중앙의 OFDM 세그먼트에 대해서는 세그먼트 안에서 주파수 인터리브를 행함에 의해 영상 전송 신호의 일부를 디지털 방송 수신기를 이용하여 수신하는 것(부분수신)이 가능하다. 그리고 전송가능한 계층 수는 최대 3이다. 그림 3은 계층전송의 개념을 나타낸다.

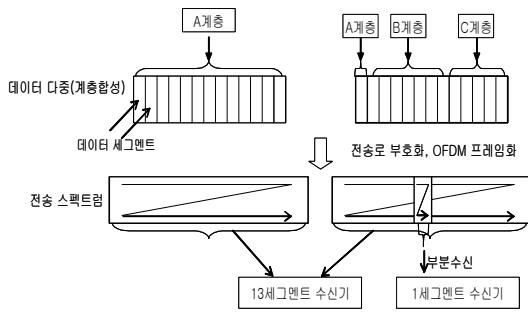


그림 3. 계층전송의 개념  
Fig. 3. Concept of Class Transmission

### III. 디지털 M/W 전송 시스템의 전력 스펙트럼 성능 평가

#### 1. 주파수 사용 조건

##### 1.1 주파수 대역폭

지상 디지털 M/W 전송 시스템에 사용하는 주파수 대역폭은 5.7 MHz로 한다. 반송파의 주파수는 주파수 대역의 중앙 주파수로 한다. 주파수 대역은 모드1의 캐리어 간격 4 kHz에서 OFDM 캐리어의 대역폭 5.572 MHz에 대해 5.7 MHz로 하고, 모드에 관계없이 적용된다. 이것은 5.572 MHz 대역폭의 상하단 캐리어가 각각 단독으로 99%의 에너지를 포함하도록 구한 대역폭 5.610 MHz에 여유를 둔 것이다. 중심주파수는 기수로 구성된 OFDM 캐리어의 중앙 캐리어의 주파수이다[6-8].

##### 1.2 IFFT 샘플 주파수와 허용편차

지상 디지털 M/W 전송 시스템의 OFDM에 사용하는 IFFT 샘플 주파수를  $f_s = 8,126,984$  Hz와 같이 하고, 또한 허용편차는  $\pm 0.3$  ppm으로 한다. 이 허용편차는 FFT 샘플 주파수의 오차에 의한 대역단 캐리어의 주파수 편차가 1 Hz 이하가 되는 것을 조건으로 한다.

##### 1.3 송신 스펙트럼 마스크

송신 스펙트럼 마스크는 다음 그림 4에 의해 규정된다. 이 마스크는 디지털 송신 신호의 왜곡 성분에만 적용하고 스푸어리스에 대해서는 대상으로 하지 않는다. 그리고 스펙트럼 마스크의 브레이크 포인트를 표 1에 나타낸다.

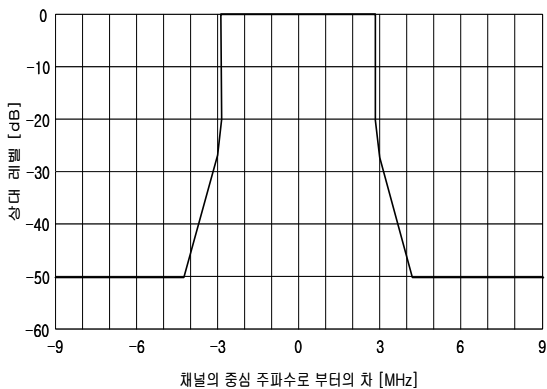


그림 4. 송신 스펙트럼 마스크  
Fig. 4. Mask of Transmission Spectrum

표 1. 송신 스펙트럼 마스크의 break point  
Table 1. Break Point of Transmission Spectrum Mask

반송파 주파수로부터의 차(MHz)	상대 감쇠량 (dB)	규정 종류
-4.36	-50	상한
-3.00	-27	상한
-2.86	-20	상한
-2.79	0	상한
2.79	0	상한
2.86	-20	상한
3.00	-27	상한
4.36	-50	상한

#### 2. 송신 스펙트럼 배치

##### 2.1 OFDM 캐리어

지상 디지털 M/W 전송 신호를 구성하는 OFDM 캐리어 수는 모드에 관계없이 기수 개이므로 반송파 주파수에 대응하는 OFDM 캐리어는 다음 표 2의 번호로 한다.

표 2. OFDM 캐리어 번호  
Table 2. Number of OFDM Carrier

전송모드	모드1	모드2	모드3
캐리어 번호	702	1404	2808

표 3은 본 논문에서 적용한 OFDM 전송신호 파라미터를 나타낸다. 표 안에서 SP는 Scattered Pilot, CP는 Continual Pilot, TMCC는 Transmission Multiplexing Configuration Control, 그리고 AC는 Auxiliary Channel를 의미한다.

표 3. 전송신호 파라미터  
Table 3. Parameter of Transmission Signal

모드	파라미터 값	
세그먼트 수(NS)	13	
대역폭	$3000/7(kHz) \times NS + 250/63(kHz)$ $= 5.575 \cdot MHz$	
차동변조부 세그먼트 수	nd	
동기변조부 세그먼트 수	$ns(ns+nd=NS)$	
캐리어 간격	$250/63-3.968 \cdot kHz$	
캐리어 수	총수	$108 \times NS + 1 = 1405$
	데이터	$96 \times NS = 1248$
	SP	$9 \times ns$
	CP	$nd + 1$
	TMCC	$ns + 5 \times nd$
	AC1	$2 \times NS = 26$
	AC2	$4 \times nd$





OFDM/ QPSK 전송 시스템의 전력 스펙트럼 밀도 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

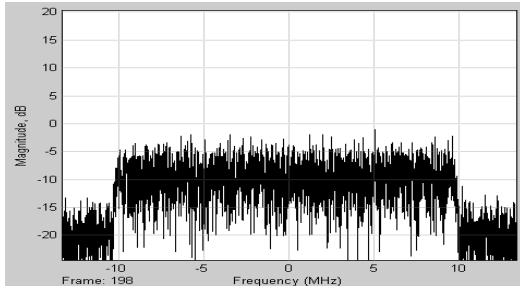


그림 12. 비선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 성능(이동 차량속도=100Km/h)  
 Fig. 12. Simulation Performance of Power Spectrum Density in Non-Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Mobile Vehicle Velocity=100Km/h)

성능 분석 결과, 그림 10의 결과와 비교했을 때 전력 스펙트럼 크기가 더욱 더 작아짐(약 5dB 정도)을 알 수 있는데, 이는 이동 차량 속도가 높아짐(도플러 주파수가 커짐)에 따른 원인으로 해석할 수 있다.

그림 13은 그림 11과 동일한 조건에서 이동 차량 속도를 100Km/h (도플러 주파수=555Hz)로 증가시켰을 때의 OFDM/ QPSK 전송 시스템의 eye diagram 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

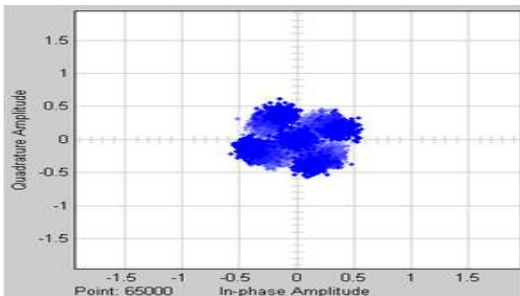


그림 13. 비선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 Eye Diagram의 시뮬레이션 성능(이동 차량속도=100Km/h)  
 Fig. 13. Simulation Performance of Eye Diagram in Non-Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Mobile Vehicle Velocity=100Km/h)

성능 분석 결과, 그림 11의 결과와 비교했을 때 이동 차량 속도가 높아짐(도플러 주파수가 커짐)에 따라 수신 신호 심볼들이 가운데로 몰려 에러가 발생할 가능성이 더욱 더 높아짐을 확인할 수 있다.

그림 14는 반송파 주파수에 따라 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 성능이 어떻게 변하는지를 비교하기 위해 반송파 주파수를 6GHz에서 14GHz로 올리고, 대역폭=20MHz, 이

동 차량 속도=60Km/h, 그리고 도플러 주파수=333Hz로 했을 때의 비선택성(Non-selective) 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 OFDM/QPSK 전송 시스템의 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

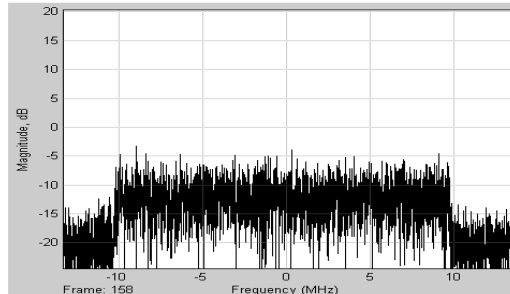


그림 14. 비선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 성능 (반송파 주파수 =14GHz)  
 Fig. 14. Simulation Performance of Power Spectrum Density in Non-Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Carrier Frequency=14GHz)

성능 분석 결과, 동일한 조건에서 반송파 주파수만 올린 경우의 결과인 그림 14를 그림 10과 비교해보면 반송파 주파수가 높아짐에 따라 전력 스펙트럼 크기가 상대적으로 약 7dB 정도 작아짐을 알 수 있다.

그림 15는 그림 14와 동일한 조건에서 eye diagram의 시뮬레이션 성능이 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

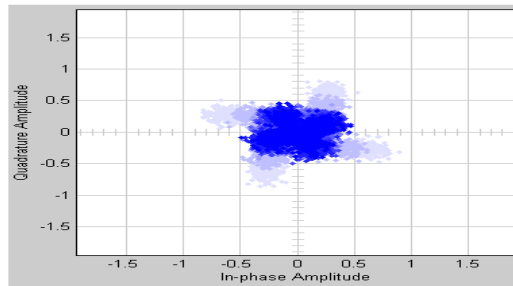


그림 15. 비선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 Eye Diagram의 시뮬레이션 성능(반송파 주파수 =14GHz)  
 Fig. 15. Simulation Performance of Eye Diagram in Non-Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Carrier Frequency=14GHz)

성능 분석 결과, 동일한 조건에서 반송파 주파수만 올린 경우의 결과인 그림 15를 그림 11과 비교해보면 반송파 주파수가 높아짐에 따라 수신 신호 심볼들이 가운데로 집중적으로 몰려 에러가 발생할 가능성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

그림 16과 그림 17은 상기 비선택성(Non-selective) 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경과 비교하기 위해 무선 채널

환경을 선택성(Selective) 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경으로 하였을 때의 시뮬레이션 성능을 나타낸다.

그림 16은 선택성(Selective) 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 대역폭=20MHz, 반송파 주파수=6GHz, 이동 차량 속도=100Km/h, 그리고 도플러 주파수=555Hz일 때 OFDM/ QPSK 전송 시스템의 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

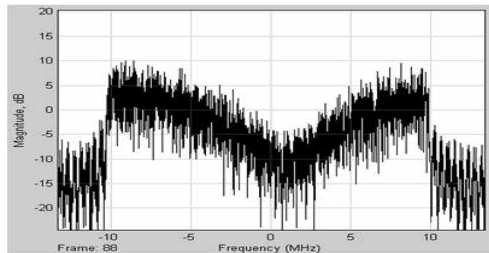


그림 16. 선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 전력 스펙트럼 밀도의 시뮬레이션 성능(이동 차량속도=100Km/h)  
 Fig. 16. Simulation Performance of Power Spectrum Density in Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Mobile Vehicle Velocity=100Km/h)

성능 분석 결과, 동일한 조건에서 비선택성 채널 환경(그림 12)과 선택성 채널 환경(그림 16)에서의 전력 스펙트럼 밀도 시뮬레이션 성능을 비교해 보면 선택성 채널 환경의 고정된 대역폭 내의 중심 주파수 부근에서 전력 스펙트럼 크기가 선택적으로 움푹 파이는 널링(nulling)이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 17은 선택성(Selective) 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 대역폭=20MHz, 반송파 주파수=6GHz, 이동 차량 속도=100Km/h, 그리고 도플러 주파수=555Hz일 때 OFDM/ QPSK 전송 시스템의 eye diagram의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

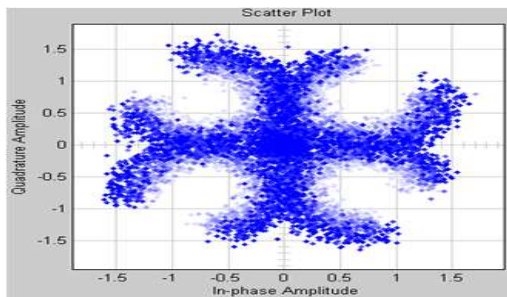


그림 17. 선택성 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경에서 Eye Diagram의 시뮬레이션 성능(이동 차량속도=100Km/h)  
 Fig. 17. Simulation Performance of Eye Diagram in Selective Rayleigh Fading Channel Environment (Mobile Vehicle Velocity=100Km/h)

성능 분석 결과, 동일한 조건에서 비선택성 채널 환경(그림 13)과 선택성 채널 환경(그림 17)에서의 eye diagram 시뮬레이션 성능을 비교해 보면 선택성 채널 환경에서의 수신 신호 심볼들의 관측 반경이 넓게 흩어져 있으므로 에러가 발생할 가능성이 더욱 높아짐을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 디지털 M/W 전송 채널을 비선택성 레일리 페이딩 채널로 모델링하고 직교 주파수 분할 다중화(OFDM ; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 적용한 디지털 M/W 전송 시스템의 전력 스펙트럼 크기를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

성능 분석 결과, AWGN 환경에서는 부반송파간의 간격이 전체 대역폭에 비해 상대적으로 작으므로 band-edge에서의 roll-off가 매우 가파름을 알 수 있었고, OFDM 신호의 스펙트럼은 자동적으로 대역 제한된 특성을 가져 out-of-band 방사 전력이 매우 작아지는 특성을 가짐을 알 수 있었다. 또한 고정된 대역폭 내에서 전력 스펙트럼 크기에 큰 널링(nulling)이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 비선택성 레일리 페이딩 채널 환경에서는 AWGN 환경보다 전력 스펙트럼 크기가 상대적으로 작아짐을 알 수 있었고, 게다가 반송파 주파수와 이동 차량 속도가 높아지면(도플러 주파수가 커지면) 전력 스펙트럼 크기가 더욱 더 작아짐을 알 수 있었다.

현재 신규 디지털 M/W 통신망 시스템 개발을 앞둔 시점에서 반드시 선행되어야 할 새로운 대역에서의 최적 채널 배치 방법 및 효율적인 전송방식에 관한 기준 정립이 되어 있지 않은 실정이다. 이에 본 논문에서는 향후 디지털 M/W 통신망의 주파수 재배치 시 주파수 이용에 대한 고효율 기술 기준을 수립하기 위해 고변조 디지털 통신망의 전력 스펙트럼 밀도에 관한 연구를 수행한 것이다. 연구 수행 결과, 도플러 주파수와 다중경로 페이딩이 시스템 성능에 매우 큰 영향을 끼침을 알 수 있었기 때문에, 향후 이러한 성능 열화를 보완할 수 있는 채널 부호화 및 최적수신기법 등과 같은 성능 개선 기법 적용에 관한 연구가 반드시 필요하다고 사료된다.

#### 참고문헌

[1] ETSI, "Digital Video Broadcasting(DVB) ; Framing Structure, Channel Coding, and Modulation for Digital Terrestrial Integrated Television," March 1997.

- [2] ITU-R WP11A, "Channel Coding, Frame Structure and Modulation Scheme for Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting," May 1999.
- [3] Robert J. Matheson, "Spectrum Usage for the Fixed Service," NTIA Report 00-378, March 2000.
- [4] "Strategy for the Future Use of the Radio Spectrum in UK 2000," Radiocommunication Agency 2000.
- [5] FCC NEWS(2002), "FCC Introduces Phase-In Plan for DTV Tuners," August 8, 2002.
- [6] T. Seki, and M. Sugimoto, "Performance of Diversity Reception for Digital Terrestrial Television Broadcasting," ITE Tech. Rep., pp. 1-6, 2001.
- [7] M. Takada, S. Kimura, and S. Moriyama, "Mobile Reception Performance for Digital Broadcasting System ISDB-T," J. of ITE, pp. 1590-1597, 2000.
- [8] H. Ohwada, "21-A Single Chip Band-Segment-Transmission OFDM Demodulator for Terrestrial Television Broadcasting," ISSCC2001 Digest of technical papers.

## 저 자 소 개



### 박 기 식

1991 : 한국항공대학교 항공통신  
정보공학과 공학사.

1996 : 한국항공대학교 항공통신  
정보공학과 공학석사.

2000 : 한국항공대학교 항공통신  
정보공학과 공학박사

현 재 : 인하공업전문대학 정보통  
신과 부교수

관심분야 : 무선통신, 이동통신

Email : gspark@inhac.ac.kr

