

---

# 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널에서 2-D PSA OFDM 시스템의 채널 추정

이병로\*

Two-Dimensional Pilot Symbol Aided Channel Estimation for OFDM Systems  
over Frequency Selective Rayleigh Fading Channel

Byung-ro Lee\*

## 요약

본 논문에서는 무선 OFDM(orthogonal frequency division multiplex) 시스템을 위한 2-D PSAM(two-dimensional pilot symbol assisted modulation)의 성능을 분석하였다. 단일 캐리어 PSAM의 분석을 OFDM의 2차원 시간-주파수 격자에 적용시켰다. 페이딩 추정을 위한 보간 방법에는 오차의 평균전력을 최소화하는 보간 필터를 사용하였으며 이차원 시간-주파수 격자에서 파일럿 심볼 패턴이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 CP(cyclic prefix)와 도플러 주파수에 따라 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널 모델에서 OFDM 시스템을 위한 2-D PSA-16QAM 성능을 분석하였다.

## ABSTRACT

In this paper we analyze the performance of 2-D PSAM for wireless OFDM systems. We apply the analysis of single-carrier PSAM to the 2-D time-frequency lattice of OFDM. To estimate channel fading, we use interpolation filter which minimizes the average power of error as compensation method and analyze the affects on the system performance of the pilot symbol pattern on the 2-D time-frequency lattice. Finally according to the CP and the Doppler frequency, we analyze the performance of 2-D PSA-16QAM for OFDM systems over frequency selective Rayleigh fading channel model.

## 키워드

PSAM, OFDM, interpolation filter, CP, Doppler frequency

---

\*진주산업대학교  
접수일자 2001. 11. 7

## 1. 서론

최근 들어 디지털 무선통신에서는 인터넷과 PDA (personal digital assistance) 단말기의 출현에 의한 멀티미디어 통신의 빠른 성장으로 인하여, 1Mb/s에서 수백Mb/s까지의 고속전송에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 고속전송을 위한 무선채널의 환경에서 주파수 선택적 페이딩 현상은 피할 수가 없다. 이와 같은 환경에서 적응 등화기를 갖는 단일 캐리어 통신 시스템은 매우 복잡해진다. PSAM기법을 이용한 OFDM(orthogonal frequency division multiplex)은 이런 문제를 해결하는 한 방법이다.

PSAM은 1980년대 후반에 단일 캐리어 시스템에서 처음 소개되어 졌다[1]. 파일럿 심볼을 보간 하여 페이딩을 추정하는 방법에는 선형 보간법[2], 2차 보간법[3], 저역통과필터 보간법[4], 최적 Wiener 필터 보간법[4] 등이 있으며 성능과 구현의 복잡도 면에서 장단점이 있다. 이러한 PSAM 기법은 주파수 이용효율이 높은 다차변조방식(multilevel modulation)에서 특히 효과적이며 PSK, QAM 등 여러 가지 변조방식에 적용되고 있다[3,4,5]. 이 방법은 플랫폼 페이딩(flat-fading) 채널에서 적용이 가능하다.

OFDM에서 한 심볼 구간 동안 일정한 페이딩을 갖는 채널에서 각 부채널(subchannel)은 플랫폼 페이딩이기 때문에 단일 캐리어 시스템의 PSAM 기법을 무선 OFDM 시스템에서 적용하려는 시도가 있어 왔다. 이 변조방식은 몇몇 사람들에 의하여 무선 OFDM에서 제안되어져 왔으며[6], 또한 European digital video broadcast (DVB) 표준 설계에 포함되어 있다[7]. 본 논문에서는 오차의 평균전력을 최소화하는 1차원 보간 필터[8]를 OFDM의 주파수-시간 영역에 적용하여 파일럿 심볼간격이 성능에 미치는 영향을 조사한다. 이를 통하여 OFDM에서 2D PSA-16QAM의 성능을  $T_{CP}$ (CP의 길이)에 따른 ISI의 영향과 도플러 주파수에 따라 COST207 채널 모델에서 분석하였다.

논문의 구성으로 제2절에서는 전체적인 시스템 구조에 대한 설명으로 먼저 OFDM시스템구조, 그리고 고려된 채널 환경, 2-D PSAM의 성능을 분석하였다. 제3절에서는 전체 시스템의 성능을 구하였다. 마지막으로 결론에서는 연구 결과를 정리하였다.

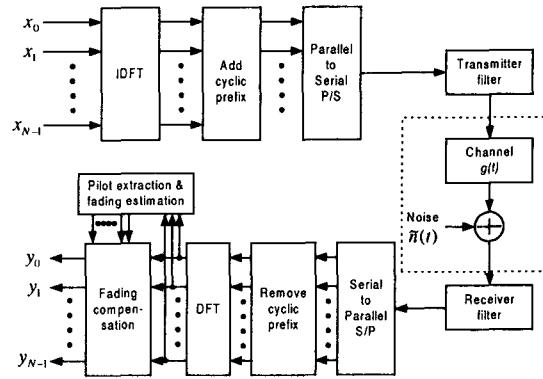


그림 1. 기저대역 OFDM 구성도  
Fig. 1 A blockdiagram of baseband OFDM system.

## II. 시스템 구조

### 1. OFDM 시스템 모델

그림 1에 기저대역 OFDM 시스템 구조를 나타내었다. 심볼 레이트  $1/T_s$ 을 갖는 16QAM 데이터는 부채널 개수  $N$ 개만큼 병렬 데이터 블록  $x_k$ 로 변환된 후 IDFT(inverse discrete Fourier transform)을 거쳐  $N$ 개의 부채널 블록을 형성한다. 그 다음  $L$ 개의 CP(cyclic prefix)를 추가하고 직렬 데이터로 변환되어 펄스 성형필터(pulse shaping filter)를 통하여 채널로 전송된다. 여기서 OFDM의 유효 심볼 길이는  $T = NT_s$ 이다. 따라서 CP가 추가된 총 심볼 길이는  $T + T_{CP}$  ( $T_{CP} = LT_s$ )이다. CP는 OFDM 심볼의 마지막 부분을 복사하여 옮긴 것으로, 연속적인 OFDM 심볼 사이에서 보호구간(guard space)처럼 동작한다.  $T_{CP}$ 가 채널의 시간 지연(rms delay)보다 크면 ISI(inter-symbol interference)를 제거 할 수 있다. 또 채널 특성이 한 심볼 구간동안 일정하다면 ICI(inter-carrier interference)를 없앨 수 있다[9]. 채널에서 함수  $g(t)$ 는 채널의 임펄스 응답이고  $n(t)$ 는 화이트 복소 가우시안 채널 노이즈이다. 수신단에서 수신된 직렬 데이터는 다시 병렬 데이터로 변환되고 CP를 제거한 후 DFT을 거친다. 마지막으로 페이딩을 보상한 후 출력  $y_k$ 를 얻게 된다. 데이터의 흐름은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= DFT_N ( IDFT_N(\mathbf{x}) \otimes \mathbf{g} + \tilde{\mathbf{n}} ) \\ &= DFT_N ( IDFT_N(\mathbf{x}) \otimes \mathbf{g} ) + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (1)$$

식 1에서  $\otimes$ 은 순환 콘볼루션(cyclic convolution)을 나타내고,  $\mathbf{x} = [x_0 x_1 \dots x_{N-1}]^T$ ,

$$\mathbf{y} = [y_0 y_1 \dots y_{N-1}]^T, \quad \tilde{\mathbf{n}} = [\tilde{n}_0 \tilde{n}_1 \dots \tilde{n}_{N-1}]^T$$

,  $\mathbf{g} = [g_0 g_1 \dots g_{N-1}]^T$ 를 나타낸다.  $\tilde{\mathbf{n}}$ 은 화이트 가우시안(White Gaussian) 채널 노이즈이므로  $\mathbf{n} = DFT(\tilde{\mathbf{n}})$ 은 역시 독립적인 가우시안 노이즈(uncorrelated Gaussian noise)이다. 따라서  $\mathbf{h} = DFT(\mathbf{g})$ 를 채널 주파수 응답이라고 하면 식 1은 Hadamard 곱,  $(\cdot)$ 에 의하여 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{x} \cdot DFT(\mathbf{g}) + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{x} \cdot \mathbf{h} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

그림 2는 펄스 성형 필터를 통과하지 않은 5MHz의 대역폭과 256개의 부채널을 갖는 OFDM 신호의 스펙트럼 특성을 나타낸다.

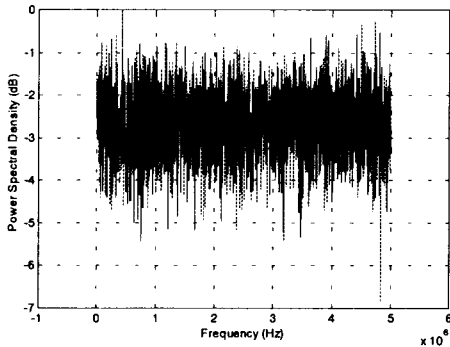


그림 2. OFDM 신호의 스펙트럼(5MHz, 256ch.)  
Fig. 2 Spectrum of OFDM signal

## 2. 채널 모델

본 논문에서는 6개의 다중경로와 최고 지연 시간이 5 $\mu$ s인 COST207의 전형적인 도심지역 모델[10]을 고려하였으며 이것의 임펄스 응답특성은 그림 3과 같다. 그림 4는 대역폭 5MHz와 256개의 부채널을 갖는 OFDM 시스템에서 그림 3의 임펄스 응답특성을 주파수 - 시간영역에 걸쳐 나타낸 것이다. 이때 고려된 최대 도플러 주파수는 부채널 대역폭의 5%이다. 이는 PSAM기법을 이용하여 페이딩 추정이 가능한 최대 도

플러 주파수에 해당되는 것으로 Cavers[4]에 의하여 분석되었다. 이를 정규화 시키면  $f_{D,max} T_s = 0.000953$ 이다. 그림 4에서 채널 특성은 시간 축으로는 부채널 대역폭의 5%에 해당되는 도플러 주파수  $f_D$ 에 의한 플랫트 페이딩 (flat fading)현상을 나타내고 있고 주파수 방향으로는 그림 3의 임펄스 응답 특성과 같은 시간 지연(rms delay)에 의한 주파수 선택적 페이딩 현상을 나타내고 있다.

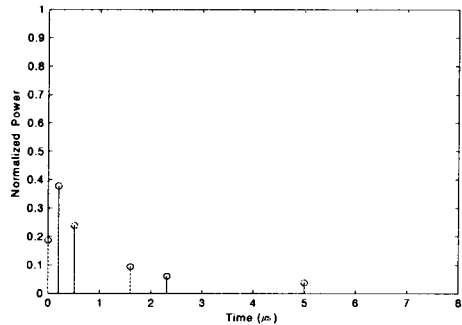


그림 3. COST207의 전형적인 도심지역 채널 전력 지연 현상  
Fig. 3 COST207 typical urban channel power delay profile[10]

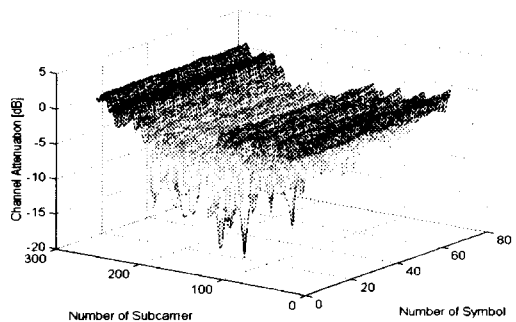


그림 4. COST207 도심지역의 주파수 선택적 채널  
Fig. 4 Frequency selective channel amplitude for COST207 typical urban model(256subchan nels,  $f_{D,max} T_s = 0.000953$ , 64symbols )

## 3. 2-D PSAM

단일 캐리어 PSAM 시스템에서 페이딩 보상을 위하여, 심볼전송속도를  $R_s$ , 최대 도플러 주파수를  $f_{D,max}$  라고 하면 왜곡이 없는 페이딩 추정을 위한 파일럿 심볼의 주기  $N_f$ 는 Nyquist의 샘플링 정리에 의

해 다음과 같이 제한된다.

$$2 \leq N_f \leq \frac{1}{2} \frac{R_s}{f_{D, \max}} \quad (3)$$

그러나 OFDM 시스템에서 파일럿 심볼은 2차원, 즉 주파수-시간 영역상의 어떤 지점에 위치하여 전송하게 된다. 1차원 필터가 주파수-시간 차원에서 샘플링 이론을 만족하기 위한 주파수 방향, 시간방향 각각에서 파일럿 심볼의 주기  $N_f$ ,  $N_t$ 는 본 논문에서 고려한  $N=256$ ,  $L=25$ ,  $f_{D, \max}=5\%$  를 대입하면 식 4와 같이 된다[11].

$$N_f < \frac{N}{L} \approx 10.2,$$

$$N_t < \frac{1}{2(1 + \frac{L}{N})f_{D, \max}} \approx 9.1 \quad (4)$$

여기서는  $N$ 은 부채널 개수,  $L$ 은 CP 개수,  $f_{D, \max}$ 는 최대 도플러 주파수이다. 그림 5는 본 논문에서 사용된 2D-PSAM 파일럿 패턴을 나타낸다. 일반적인 페이딩 추정방법은 그림 5에서처럼 먼저 주파수 방향으로 1차원 필터를 적용하고, 다음으로 그 추정치를 시간 방향으로 적용하여 영역상에 있는 모든 샘플들을 보상하게 된다. 본 논문에서는 그림 5의 구조를 갖는 2차원 파일럿 패턴을 사용하여 대역폭 5MHz,  $N=256$ ,  $L=25$ ,  $f_{D, \max}=5\%$ 에서 최적의 파일럿 패턴을 구하기 위하여 패턴에 따른 성능을 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서  $f_{D, \max}=5\%$ 일 때 최적의 파일럿 패턴은  $N_f=2, N_t=8$ 임을 알 수 있다. 이는 식 4를 만족한다.

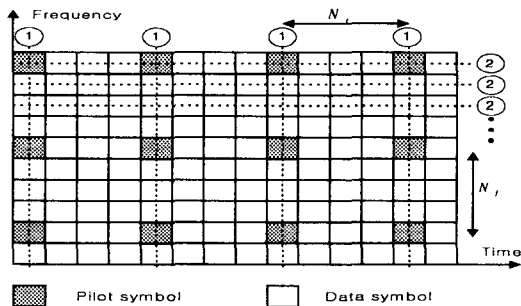


그림 5. 1-D 필터의 주파수-시간 방향으로의 적용  
Fig. 5 Applying of one-dimensional filter in frequency and time directions

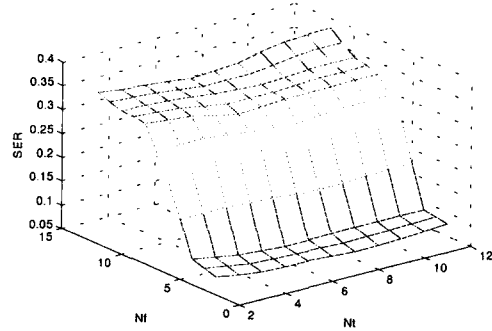


그림 6. 보간필터에 의한 파일럿 심볼 패턴에 따른 PSA-16QAM SER  
Fig. 6 PSA-16QAM SER as a function of pilot symbol pattern with interpolation filter  
( $f_{D, \max}=5\%$ ,  $E_b/N_0=15dB$ )

### III. 시스템 성능

본 논문에서는 그림 3에 나타난 COST207의 전형적인 도심지역 채널 모델에서 대역폭이 5MHz,  $N=256$ 인 부채널을 갖는 디지털 멀티미디어 전송이 가능한 무선 PSA-16 QAM OFDM 시스템을 고려하였다. 고려된 채널 환경에서 먼저  $T_{CP}$ 에 따른 ISI가 시스템 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여  $f_{D, \max}=5\%$ 일 때  $T_{CP}$ 에 따른 성능을 분석하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서  $T_{CP}$ 가 크질수록 시스템 성능이 현저히 증가하고 ISI를 완전히 제거하기 위한  $T_{CP}$ 는 채널의 최대 지연시간인 5μs 이상이어야 함을 알 수 있다. 다음으로 ISI가 완전히 제거된 상태에서 도플러 주파수가 시스템 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 주어진 도플러 주파수에서 최적의 조건인 2-D 파일럿 패턴,  $f_D=5\%$ (부채널의 5%)일 때  $N_f=2, N_t=8, f_D=3\%$ 일 때  $N_f=2, N_t=9, f_D=1\%$ 일 때  $N_f=2, N_t=10$ 을 사용하여 도플러 주파수에 따른 성능을 그림 8에 나타내었다. 예상되는 바와 같이 도플러 주파수가 증가할수록 시스템 성능이 감소하나 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그림 9는 파일럿 패턴이 채널에 잘못 적용(mismatch)된 경우의 성능을 나타낸 것으로  $N_f=8, N_t=8$  일 때  $f_D=5\%$ 와  $f_D=1\%$ 에서 제대로 보상이 되지 않음을 알 수 있다.

그러나 최대 도플러 주파수,  $f_{D, \max} = 5\%$ 에 최적화된  $N_f=2$ ,  $N_t=8$ 을 사용하여  $f_D=1\sim 5\%$ 에서의 성능은 각각의 도플러 주파수에 최적화된 파일럿 패턴을 사용한 그림 8의 성과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

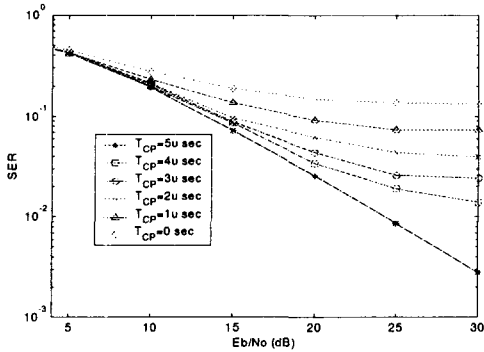


그림 7. CP에 따른 PSA-16QAM OFDM의 성능  
Fig. 7 Performance of PSA-16QAM OFDM systems according to the number of CP under COST207 model ( $f_D T_s = 0.00095$ )

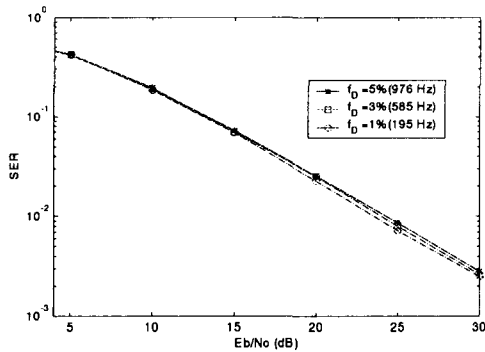


그림 8. 최적화된 2-D PSA-16QAM OFDM의 성능  
Fig. 8 SER Performance of optimized 2-D PSA-16QAM OFDM

## VI. 결론

OFDM시스템에서 2-D PSAM의 성능을 구하기 위하여 먼저 오차의 평균 전력을 최소화하는 보간필터를 사용하여 최대 도플러 주파수,  $f_{D, \max} = 5\%$ 에서 최적화된 파일럿 패턴은  $N_f=2$ ,  $N_t=8$ 임을 알 수 있었

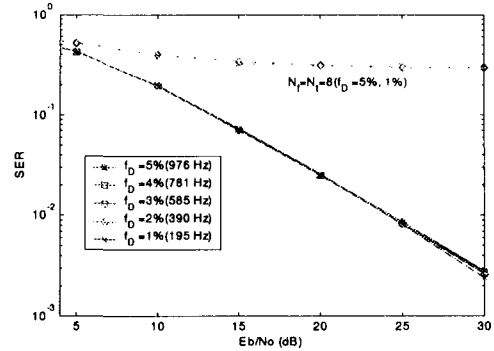


그림 9.  $N_f, N_t$ 가 잘못 적용된 PSA-16QAM OFDM  
Fig. 9 PSA-16QAM OFDM : Mismatched with  $N_f$  and  $N_t$  optimized for  $f_D T_s = 0.00095$ ,  $E_b/N_0 = 15dB$

다. 그리하여 ISI를 제거 하기 위해 채널의 최대 지연 시간인  $5\mu s$ 이상의  $T_{CP}$ 를 사용해야 함을 확인할 수 있었다. 또한 주어진 도플러 주파수에서 최적화된 파일럿 패턴을 사용하여 최적화된 2-D PSA-16QAM의 성능을 구할 수 있었고 파일럿 패턴이 잘못 적용 (mismatch)된 경우에는 페이딩이 제대로 보상되지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 최대 도플러 주파수,  $f_{D, \max} = 5\%$ (부채널의 5%)에서 최적화된 파일럿 패턴( $N_f=2$ ,  $N_t=8$ )은  $f_D=1\sim 5\%$ (부채널 대역의 5% 이내)에서 2-D PSA-16QAM OFDM시스템의 정상적인 성능을 구할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 COST207의 전형적인 도심지역 모델에서 최대도플러 주파수,  $f_{D, \max} = 5\%$ 에서 최적화된 파일럿 패턴을 사용하여 정상적인 2-D PSA-16QAM OFDM시스템의 성능을 구할 수 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] M. L. Moher and J. H. Lodge, "TCMP-a modulation and coding strategy for Rician fading channels," IEEE J. Select. Areas Comm., VT-7, pp.1347-1355, Dec. 1989.
- [2] J.M. Torrance and L. Hanzo, "Comparative study of pilot symbol assisted modem schemes," Proc. Radio Receiver and Associated Systems

- Conference, Bath, UK, pp. 26 - 28, Sept. 1995.
- [3] S. Sampei and T. Sunaga, "Rayleigh fading compensation for QAM in land mobile radio communications," IEEE Trans. Vehi. Tech., VT-42, pp.137-147, May 1993.
- [4] J. K. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Vehi. Tech., VT-40, pp.686-693, Nov. 1991.
- [5] C. L. Liu and K. Feher, "Pilot-symbol aided coherent M-ary PSK in frequency-selective fast Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Comm., VT-42, pp.54-62, Jan. 1994.
- [6] Peter Hoher, "TCM on frequency-selective land-mobile fading channels," 5th Tirrenia International Workshop on Digital Communications, Tirrenia, Italy, Sept. 1991.
- [7] Digital broadcasting systems for television, sound and data services. Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, DRAFT prETS 300 744, European Telecommunications Standards Institute, Sept. 1996.
- [8] Programs for Digital Signal Processing, IEEE Press, 1979.
- [9] A. Peled and A. Ruiz. "Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms," IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, pp.964-967, Denver, CO, 1980.
- [10] COST207 TD(86)51-REV 3 (WG), "Proposal on channel transfer function to be used in GSM tests late 1986," Sept. 1986.
- [11] R. Nilsson, O. Edfors, M. Sandell, and P.O. Børjesson. "An analysis of two-dimensional pilot-symbol assisted modulation for OFDM," IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, pp.71-74, Dec. 1997.



이병로(Byung-Ro Lee)

1989년 2월 : 아주대학교 전자공학과(공학사)

1988년 ~ 1992년 : LG 전자

1995년 2월 : 동아대학교 전자공학과(공학석사)

1998년 2월 : 경상대학교 전자학과(공학박사)

2000년 3월 ~ 현재 : 진주산업대학교 전자공학과 전임강사

※관심분야 : 멀티미디어 이동통신, 적응변조, 멀티캐리어시스템