

# 광대역 무선통신 채널 환경에서 OFDM 시스템의 성능개선

## Performance Improvement of OFDM Systems in Broadband Wireless Communication Channel Environments

강희조\*

Heau-Jo Kang\*

### 요 약

본 논문에서는 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널과 마이크로파 대역의 2경로 Rumber's 채널 환경에서 적응 등화기를 채용한 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다. 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 시스템 성능 분석 결과 주파수 오프셋의 증가에 따른 성능이 급격히 열화 됨을 알 수 있다, 그리고 시스템에서 적응 등화기를 채용한 경우에는 일정 범위 내에서 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we analyzed the performance of OFDM systems with adaptive equalizer that considers the frequency offset, the frequency non-selective fading, and two-path microwave Rumber's model channels. First of all, it is analyzed that the performance degradation, which is caused by the offset and the non-selective fading channel, through simulation. As the results of the simulation, the performance of the OFDM system is greatly influenced by the offset and channels. The more the frequency offset is, the worse the performance of the OFDM system is. However, if the adaptive equalizer is adopted to the OFDM system, the performance is enhanced up to the limited rang.

Key words : Clarke& Gans model, Rumber's model, frequency offset, adaptive equalizer

### I. 서 론

최근 들어 사회생활이 복잡해지고 고도화됨에 따라 다수의 이용자들에게 고품질의 무선 통신서비스를 제공할 수 있는 무선 데이터 통신시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 멀티미디어 서비스의 급속한 성장으로 인하여 무선 LAN(Local Area Network)에 대한 관심이 고조되고 있고, 미국에

서는 FCC가 5GHz 대역에 U-NII(Unlicensed National Information Infra structure) 주파수대를 설정하고 무선 LAN과 무선 인터넷, 무선 데이터 서비스 등을 초고속 정보 통신망에 수용할 기반을 마련하고 있다[1]. 급증하는 정보 통신의 수요와 다양한 정보 매체의 이용이 늘어남에 따라서 통신의 서비스는 디지털 및 대용량 고속 서비스를 필요로 하게 되었다. 이러한 정보 통신의 요구 조건을 만족하기 위하여 병렬 채널과

\* 목원대학교 컴퓨터공학부(Division of Computer Engineering, Mokwon University)

· 제1저자 (First Author) : 강희조

· 접수일자 : 2007년 1월 29일

다중 반송파를 이용한 대용량 통신 방식을 고안하게 되었으며, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식이 가장 널리 알려진 다중 반송파 시스템의 하나이다[1],[2].

OFDM 방식은 변복조시에 고속 푸리에 변환 알고리즘을 사용하므로 회로의 규모를 작게 할 수 있고, 또한 OFDM 신호는 데이터를 병렬화하여 전송하는 특징을 가지므로 단일 반송파에 비해 넓은 심볼 간격을 가지므로 인해 각각의 부 채널 신호는 협대역 특성을 가지게 되어 고속 전송 시에도 적절한 부 반송파의 개수를 선택하여 주파수 비선택성 페이딩의 영향을 받도록 만들 수 있다. 그리고 보호 구간을 삽입함에 의해 보호 구간 길이 보다 지연 시간이 작은 지연 성분에 의해 발생하는 ISI (Inter-Symbol Interference)의 영향을 완전히 제거 할 수 있다는 장점이 있으므로 최근 IEEE 802.11a 및 HIPERLAN/2 무선 랜 표준안에서도 OFDM 방식이 채택되었다 [3],[4]. 성능 저하를 방지하기 위하여 OFDM 전송방식에서는 시간영역 송신신호에 대해 보호구간을 삽입하는 방법 외에 선택적 페이딩 채널응답을 보상하기 위한 등화기, 채널 에러에 보다 강하게 정보 신호를 송·수신 및 복원하기 위해 인터리빙 및 채널 코딩 등의 다양한 기법을 적용하여 전송시스템의 성능 저하를 보상하게 된다[5],[6]. 그러나, OFDM 시스템에서는 다수의 부 반송파를 사용하게 되므로 송·수신단에서 변조 및 복조에 사용되는 반송파의 주파수가 정확하게 일치되지 않는 경우 단일 반송파 방식에 비하여 에러의 증가율이 높아지게 된다. 이러한 반송파 주파수의 오차 그리고 데이터의 시작 위치를 정확히 찾지 못하여 발생하는 시간동기 오차 등은 OFDM의 특성과 관련하여 심각한 성능저하의 요인이 되고 있다[7].

본 논문에서는 가우스 잡음과 페이딩, 그리고 송·수신단의 반송파 동기 오차로 인해 발생하는 주파수 오프셋의 영향이 시스템 성능에 주는 영향을 분석하고, 주파수 비선택성 및 선택성 페이딩 채널에서 등화기 기법을 적용한 OFDM 시스템의 성능을 분석한다. 성능 분석을 위해 사용하는 등화기는 여분의 training sequence 혹은 파일럿 심벌이 불필요한 브랜드 형태의 적응형 등화기이다. 비선택성 페이딩 채널

모델로는 Clarke & Gans 채널모델을, 주파수 선택성 페이딩 모델로는 마이크로파 전송 링크에 대한 채널로 널리 사용되는 Rummmler 채널 모델을 이용한 다중 경로 페이딩 채널을 도입하여 시뮬레이션을 수행한다. 비선택성 페이딩과 선택성 페이딩으로 구분된 각각의 채널 환경에서 개선된 적응 등화기를 채용한 OFDM 시스템의 성능분석 결과를 토대로 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템의 구조

### 2-1 OFDM 시스템 송수신부 구성

스펙트럼 효율이 좋으면서 고속 고품질의 차세대 광대역 무선 통신을 위해 OFDM 시스템의 송수신부에 대한 구조, 동작원리에 대해 설명과 FFT/IFFT 알고리즘에 대하여 모델링 한다. 그림 1은 무선 채널을 포함한 OFDM 시스템의 해석 모델을 나타낸다.

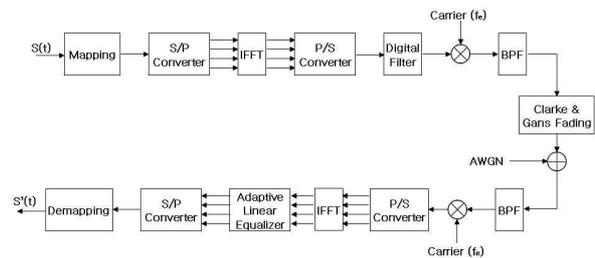


그림 1. OFDM 시스템 해석 모델  
Fig. 1. Analysis model of OFDM system

그림 1에서 무선 채널에 대한 부분은 가우스 잡음과, 페이딩 채널과 주파수 오프셋을 고려하였는데, 페이딩 채널 모델로는 이동통신 환경에서 발생하는 도플러 천이 효과를 고려한 Clark & Gans의 채널모델과 마이크로파 링크에 전형적으로 사용되는 Rummmler 채널 모델을 이용한 2경로 채널을 각각 고려하였다 [8].

### 2-2 적응 등화기

그림 2에 적응 등화기의 구성을 나타낸다. 적응 등화기는 등화 필터부, 데이터 판정부, 탭 이득 갱신부로 구성된다.

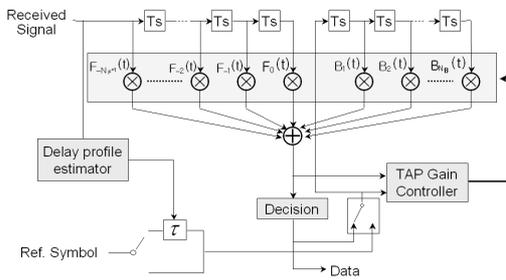


그림 2. 적응 등화기의 구성  
Fig. 2. Structure of adaptive equalizer

그림 2에 나타난 등화 필터부 내의 탭 이득이  $F_i(t) = (i = 0, 1, 2 \dots)$ 로 나타낸 탭은  $F_0(t)$ 로 표현된 센터 타입으로부터 현재까지는 미래의 데이터를 합성하기 위한 탭이고 피드 포워드 타입(FF)이라고 부른다. 한편  $B_i = (i = 1, 2 \dots)$ 로 표현되는 탭은 센터 탭에서 보면 과거의 데이터를 합성하기 위한 탭이고 이를 피드백(FB)라 부른다. 여기서 FB 탭에는 통상적으로는 데이터의 판정치가 입력되지만 등화기의 초기 설정에 있어서는 탭 이득의 고속화를 위해 긴 훈련 심벌을 사용한다. 이 경우, FB 탭에는 이미 알고 있는 신호가 참조 신호로서 입력된다.

여기서 탭에 입력된 입력 신호 벡터  $y(t)$ 를

$$y(t) = (y(t + (N_f - 1)T_s), y(t + (N_f - 2)T_s), \dots, y(t), a(t - T_s), a(t - 2T_s), \dots, a(t - N_b T_s))^T \quad (1)$$

탭 이득 벡터  $c(t)$ 를

$$c(t) = (F_{-N_f+1}(t), F_{-N_f+2}(t), \dots, F_0(t), B_1(t), B_2(t), \dots, B_{N_b}(t))^T \quad (2)$$

라 하면 등화기 출력  $z(t)$ 는

$$z(t) = c^T(t) y(t) \quad (3)$$

으로 표현된다. 단 시각  $t$ 에 있어서 수신신호를  $y(t)$ ,  $z(t)$ 로부터 추정되는 판정치  $\hat{a}_t$ ,  $y$ 의 전치

벡터를  $y^T$ 로 나타낸다.

탭 이득 제어부에서는 다음 식으로 표현되는  $\hat{a}_t$ 와  $z(t)$ 의 오차  $e(t)$ 를 측정하고,

$$e(t) = \hat{a}(t) - z(t) \quad (4)$$

$e(t)$ 의 2승 평균 오차  $E[|e(t)|^2]$ 가 최소가 되도록  $c(t)$ 를 제어한다.

적용 등화기의 동작 원리를 탭 이득이 이상적으로 제어되는 경우에 대해서 나타낸 것이 그림 3이다. 우선 그림 3 (a)에 나타낸 바와 같이 직접파가 지연과 보다 큰 경우(최소 위상 조건)의 동작 원리에 대해서 기술한다. 여기서는 간단히 하기 위해 아래와 같은 두 경로의 모델을 생각한다.

$$h(t) = \delta(t) + \frac{1}{2} \delta(t - T_s) \quad (5)$$

이와 같은 경우 적응 등화기는 FB 탭에 의해 지연파의 레프리카  $B_1(t)\hat{a}(t)$ 을 생성하고 그것을  $F_0(t)y(t)$ 에서 제거하는 것에 의해 직접파만을 얻어내고 있다. 일반적으로 최소 위상 조건에 있어서  $n$  심벌 지연의 지연파가 존재하는 경우 적응 등화기는 탭 이득이  $B_n$ 으로 표현되는 탭에 의해 지연파의 레프리카를 생성하고, 지연파를 제거, 직접파를 얻어낸다.

다음으로 지연과 쪽이 직접파 보다 큰 경우(비 최소 위상 조건)의 동작 원리를 그림 3 (b)에 나타낸다. 여기서는 전송로 모델로서 다음 식

$$h(t) = \frac{1}{2} \delta(t) + \delta(t - T_s) \quad (6)$$

이 경우, 적응 등화기는  $F_{-1}$  탭의 입력에 의해  $y(t + T_s)$ 의 지연과 성분만을 추출하고,  $F_{-2}$  탭의 입력에 의해  $y(t + T_s)$ 의 직접과 성분을 제거한다. 이 때,  $t = -2T_s$ 의 위치에 새로운 왜곡 성분이 발생하는데 이것은  $F_{-3}$  탭의 입력에 의해 제거 된다.

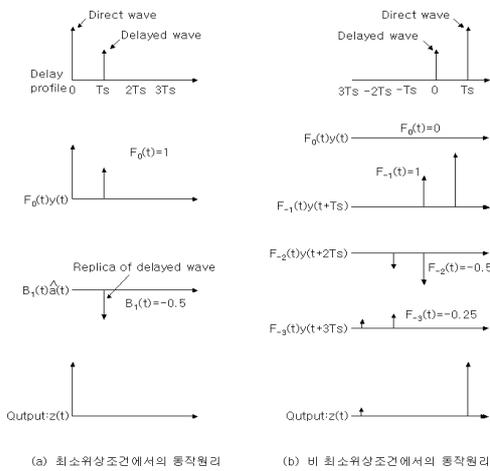


그림 3. 적응 등화기의 동작 원리  
Fig. 3. Principle of adaptive equalizer

동시에  $t = -3 T_s$ 의 부분에 왜곡 성분이 발생하는데 이는 피드 포워드 탭 수를 증가시키는 것에 의해 제거가 가능하며 왜곡 성분을 충분히 작게 하는 것이 가능하다. 일반적으로 비 최소 위상 조건에 있어서  $n$  심벌 지연의 지연파가 존재하는 경우, 적응 등화기는 탭 이득이  $F_{-in}(i = 1, 2, \dots)$ 으로 표현되는 탭에 의해 지연파만을 추출한다. 단, 잔류 지연파를 충분히 작게 하기 위해서는 직접파와 지연파의 전력 차가 작게 될 수록 많은 FF 탭이 필요하게 되고, 탭 수가 많아지면 탭 이득의 처리가 늦어지고 계산량의 증가 등의 문제점이 일어나기 때문에 등화하고 싶은 지연파의 지연시간, 전송로 환경에 의해 적절한 값을 결정할 필요가 있다. 양방향 등화를 행하면 전방 등화에 있어서는 비 최소 위상 조건이었던 것이 후방 등화의 경우에는 최소 위상 조건이 되는 경우가 있고, 후방 등화만을 행하는 경우와 비교하여 전방 특성의 향상이 기대된다. 단, 후방 등화를 행하는 경우, FB에 의해 직접파를 제거하고 지연파만을 추출하도록 동작시킬 필요가 있기 때문에 참조 신호를 지연파에 동기 시킬 필요가 생기는데 일반적으로 지연파의 지연 시간을 알 수 없다.

이 문제점에 대한 하나의 방법은 프리엠블에 사용 되는 훈련 심벌은 이미 알고 있는 신호 계열이기 때문에 이것을 이용하여 평균 지연 프로파일을 구하는 것이 가능하다. 그래서 이것에 의해 지연파의 지연시간을 구하고 프레임마다에 후방 등화에 있어서 참조 신호 타이밍을 변화시키는 방식을 생각할 수 있게 된다.

다. 참조 타이밍을 고정적으로 지연시키는 방법으로 비교하여 이 방법의 이점은 참조 신호 타이밍과 실제 지연파의 지연시간의 차를 흡수하기 위해 FF 타이밍이 불필요하게 되는데, FF 탭수를 작게 하는 것이다.

### III. 시스템 성능 분석 및 검토

#### 3-1 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋에 의한 성능 분석

주파수 비선택성 페이딩 시뮬레이션은  $f_d \times T = 0.05$ 로 하였다. 만약 IEEE 802.11a 규격에 맞추어서 5 GHz 대역을 사용하는 경우 100 km/h의 속도로 움직이는 이동체에서는 약 500 Hz의 최대 도플러 쉬프트 주파수가 발생된다. 이때 시스템이 1.2 Mbps의 전송속도를 가지게 되면  $f_d \times T = 0.05$ 의 조건을 만족하게 된다.

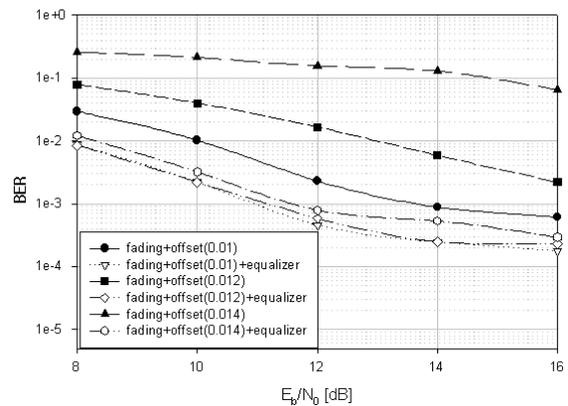


그림 4. 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 적응 등화기 OFDM 시스템 성능

Fig. 4. Performance of the OFDM system using under non-selective adaptive equalizer fading and frequency offset channel

그림 4은 주파수 비 선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 주파수 단일 탭 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템의 BER 성능을 나타냈다. 성능 분석 결과 비 선택성 페이딩과 0.014이하의 주파수 오프셋의 영향을 받은 성능 곡선들은 적응

형 등화기를 사용하여 거의 동일한 성능을 얻을 수 있도록 향상된다.

### 3-2 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템의 성능 분석

다중경로 페이딩 환경에서 적응 등화기를 적용한 적응변조 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다. 긴 훈련심벌을 통해 추정된 주파수 응답계수를 IFFT함으로써 시간축 상에서 지연프로파일의 추정이 가능하고 IFFT의 결과로 적응 등화기에 적용될 초기 등화계수를 적용함으로써 채널환경에 따라 왜곡을 받은 신호파형의 보상이 가능함을 알 수 있다.

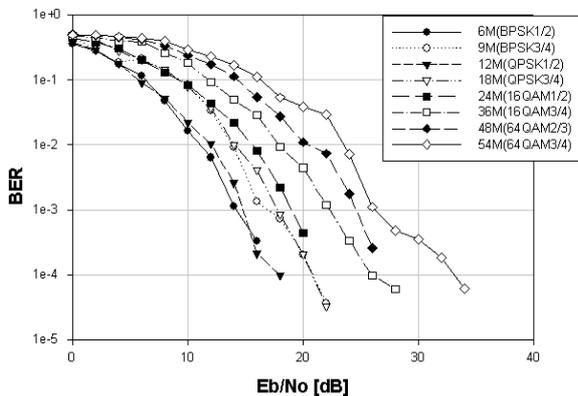


그림 5. 무선 채널에서 각 변조 모드별 BER 성능  
Fig. 5. BER performance according to modulation mode in wireless channel

그림 5는 무선 채널에서 각 변조 방식별 성능을 나타내고 있고, 적응 등화기를 적용함에 따라 왜곡을 받은 신호 파형의 보상이 가능함을 알 수 있다.

### 3.2 Clarke & Gans 페이딩 채널에서 OFDM 시스템의 성능

100km/h의 속도로 움직이는 이동체에서는 약 500Hz의 도플러 쉬프트 주파수가 발생한다. 주파수 선택성 페이딩 환경에서 OFDM 신호의 부 반송파들이 받는 페이딩 특성은 다르게 되므로 주파수 선택적으로 깊은 페이딩의 영향을 받는 부 반송파가 존재할 수도 있다. 이런 경우에는 각 부 채널로 전송되는 정보데이터를 복원하기 위해서는 수신된 각 부 채널의

역수를 곱해주게 된다.

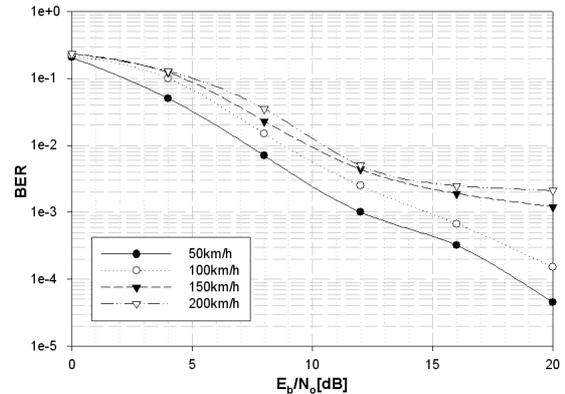


그림 6. Clarke & Gans 모델에서 적응 등화기를 채용한 BER 성능  
Fig. 6. BER performance according to adaptive equalizer of Clarke & Gans model

그림 6는 적응 등화기를 채용하여 루어지고, 5.6dB 이상에서는 성능 분석 결과 BER 10<sup>-2</sup> 을 기준으로 무선 데이터 통신이 가능한 차량의 이동 속도가 150km/h 이상인 경우 1dB 정도의 작은 성능 향상이 되며, 100km/h 이하인 경우 높은 성능 향상이 이루어짐을 확인 할 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 존재하는 광대역 무선 통신 채널과 마이크로파 대역의 2 경로 채널에서 적응 등화기를 제안하고 이의 성능을 구하였다. 성능 개선방법으로는 적응 등화기를 채용하여 시스템의 성능 개선정도를 비교 분석하였다. 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 무선 채널 환경에서 시스템의 성능 분석 결과 주파수 오프셋의 증가에 따른 성능이 급격히 나빠짐을 확인할 수 있으며 적응 등화기를 채용된 경우에는 일정 범위 내에서 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한 Clark & Gans 페이딩 채널 환경에서 도플러 주파수 발생시 최대 도플러 천이 주파수가 클수록 시스템 성능이 악화됨을 알 수 있었고, 적응 등화기를 채용하여 성능 분석을 한 경우 차량의 이동 속도가 150km/h 이상인 경우 약 1dB 정도의 성능이 향상이 되며 100km/h 이하에서는 성능개선의

효과가 매우 향상됨을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Hara, K. Fukui, M. Okada, and N. Morinaga, "Multicarrier modulation technique for broadband indoor wireless communication," *Proc. 4th Int. Symp. PIMRC, Yokohama Japan*, pp. E1.2.5, 1993.
- [2] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-15, May 1990.
- [3] M. Alard and R. Lassalle, "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers," *EUR Review-Technical*, vol. 224, pp. 168-190, Aug. 1987.
- [4] Blahut, R. E., *Fast Algorithms for Digital Signal Processing*. Reading, MA : Addison-Wesley, 1985.
- [5] S. Hara, M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, "Transmission performance analysis of multicarrier modulation in frequency selective fast Rayleigh fading channel," *Wireless Personal Commun.*, vol. 2, pp. 335-356, Jan.-Feb. 1996.
- [6] Pommier D., and Wu Yi, "Interleaving or spectrum-spread in digital radio intended for vehicles," *EBU Review-Technical* vol. 217, pp. 128-142, June 1986.
- [7] T. Pollet, M. van Bladel and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise," *IEEE Trans. on Commun*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 191-193, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [8] Richard Van Nee, Ramjee Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communication*, Artech House, 2000.

### 강 희 조 (姜熙照)



1994년 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 (공학박사)

1996년~1997년 일본 오사카대학교 공학부 통신공학과 객원교수

1990년~2003년 2월 동신대학교 전자정보통신공학부 교수

2003년~현재 : 목원대학교 컴퓨터공

학부 교수

관심분야 : 멀티미디어통신, 유비쿼터스, 무선이동통신, 가시광통신, 모바일 컴퓨터, 환경전자공학, RFID, 디지털콘텐츠