

## 마이크로파 대역 Two-path 채널 환경에서 개선된 Dual 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템의 성능 분석

김 장 옥\*

### Performance Analysis of OFDM with Improved Dual Adaptive Equalizer in microwave band Two-path Channel Environments

Jang Wook Kim\*

#### 요 약

본 논문에서는 마이크로파 대역의 Two-path 채널 환경하에서 세 가지 형태의 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템을 분석하였다. 마이크로파 대역의 Two-path 채널은 Rumlmler 채널 모델링을 통해 시뮬레이션 하였다.

Two-path 채널 환경에서 세가지 형태의 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템에 대한 성능 분석 결과, 주파수 1-탭 적응 등화기를 적용한 경우에는  $E_s/N_0$ 가 18 dB 이내인 심볼 에너지 대 잡음 전력비인 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기에 비해 높은 성능 향상을 확인할 수 있으며, 반면에 심볼 에너지 대 잡음 전력비  $E_s/N_0$ 가 18 dB 이상인 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 적용한 시스템이 주파수 1-탭 적응 등화기를 적용한 시스템에 비해 높은 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있다. 그리고 마지막으로, Dual 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템은 주파수 1-탭 적응 등화기를 사용한 시스템 또는 Pre-FFT 11-tap 적응 등화기를 사용한 시스템에 비해서 보다 향상된 성능 개선을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Based on this article, I have analyzed the OFDM system which applies three types of equalizer forms in the two-path channel of the microwave baseband. The Two-path channel of microwave baseband had been simulated through the Rumlmler channel.

In the Two-path channel, the OFDM system which has three forms of equalizer has been analyzed and the result is, equalizer 1-tab has great improvement in efficiency compared with Pre-FFT 11-tab which has noise power ratio less than 18dB. On the contrary, if the symbol energy

• 제1저자 : 김장옥

• 투고일 : 2009. 06. 09, 심사일 : 2009. 06. 17, 게재확정일 : 2009. 07. 20.

\* 동양공업전문대학 전기전자통신공학부

※ 본 논문은 동양공업전문대학의 학술연구과제를 통해 연구되었음을 알립니다.

to the noise ratio is more than 18dB, the equalizer which applies Pre-FFT 11-tab has greater efficiency compared to the equalizer which applies 1-tab frequency.

Last but not least, the OFDM system which applies Dual equalizer has better efficiency compared to the system which has 1-tab frequency and equalizer which applies Pre-FFT 11-tab.

▶ Keyword : OFDM, Equalizer, AWGN, Fading, 등화기, 페이딩

## I. 서론

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

본 논문에서는 AWGN (Additive White Gaussian Noise)과 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 OFDM시스템의 성능을 분석한다.[3, 4]

본 논문은 5장으로 구성되는데 제 1 장 서론에 이어 제 2 장에서는 OFDM 송·수신단을 구현하기 위해 필요한 기본원리 및 이론을 설명한다. 제 3 장에서는 성능 분석을 위해 사용하는 등화기에 대해 설명하였다. 본 논문에서는 여분의 training sequence 혹은 pilot symbol이 불필요한 blind 형태의 적응형 등화기이다. 본 논문에서의 등화기는 주파수 1-탭 적응 등화기, Pre-FFT 11-탭 적응 등화기 그리고 두 등화기를 병행하여 사용한 Dual 적응 등화기이다.

제 4 장에서는 주파수 선택성 페이딩 모델로 마이크로파 전송 링크에 대한 채널로 널리 사용되는 Rumlmler 채널 모델을 설명하였고, 이 채널을 이용한 Two-path 다중경로 페이딩 채널을 도입하여 각각을 설명하고 시뮬레이션을 수행했다.

또한 AWGN, 반송파 주파수 오프셋, 다중경로 페이딩이 존재하는 환경에서 해석적 기법 및 시뮬레이션 기법을 이용하여 OFDM 시스템의 성능을 분석했다.

마지막으로 5장에서는 마이크로파 대역의 Tow-path 채널 환경에서 개선된 Dual 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템의 성능 분석 결과를 토대로 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템

OFDM 방식은 변복조시에 고속 푸리에 변환 (FFT : Fast Fourier Transform) 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 전송시에도 적절한 부 반송파의 개수를 선택하여 주파수 비선택성 (Frequency Non-Selective) 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 WLAN (Wireless LAN) 표준안에서도 OFDM 방식이 채택되었다[5, 6].

OFDM 전송방식은 채널의 스펙트럼 효율을 극대화하기 위하여 부 채널간 간섭이 발생하지 않도록 부 채널간 직교성을 유지하여 전송해야 하는 점이 핵심적인 사항이다. 그러나 고속데이터를 전송하기 위해서는 필연적으로 광대역 채널을 사용하게 되어 전체적인 신호 대역폭을 고려하게 되면 주파수 선택적 페이딩 현상이 발생하게 된다. 이 주파수 선택적 페이딩 환경에서는 직교성이 상실되어 시스템의 성능 저하가 발생하게 된다. 이러한 성능 저하를 방지하기 위하여 OFDM 전송방식에서는 시간영역 송신신호에 대해 보호구간(Guard Interval)을 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 성능저하를 보상하게 된다 [7, 8].

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[9].

### III. 적응형 등화기

본 논문에서는 채널 응답 왜곡을 보상하기 위해 세가지 형태의 적응형 등화기를 사용한다. 세가지 형태의 적응형 등화기는 주파수 1-탭 적응 등화기, Pre-FFT 11-탭 적응 등화기와 두 등화기를 조합하여 사용한 Dual 적응 등화기이다. 일반적인 형태의 적응 등화기는 그림 1에서 나타내었다[10, 11].

등화기는 채널상의 왜곡을 수신단에서 최적의 계수 벡터를 곱하여 보상에 주는 역할을 한다. 실질적으로는 최적 계수 벡터를 구하기 위해서 반복적인 (iterative procedure) 기법을 주로 사용한다. 가장 간단한 반복 기법은 그림 2에 나타낸 것과 같이 임의의 초기 계수 벡터  $c$  (흔히  $c_0$ 로 말함)에서 시작하여 기울기를 구하는 방법을 사용한다.

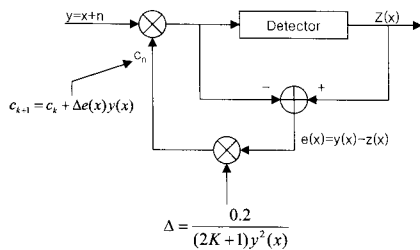


그림 1. 적응 선형 등화기 모델의 예  
Fig. 1. Example of Adaptive Linear Equalizer

제곱 에러는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\epsilon^2(t) = [x(t) - z(t)]^2 = \left[ x(t) - \sum_{k=-M}^M c_k y(t-kT) \right]^2 \dots\dots (1)$$

식 (1)에서 자승에러의 최소값을 구해 내기 위해 양변을 계수  $c$ 에 대해 미분을 취하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon^2(t)}{dC_n} &= -2 \left[ x(t) - \sum_k c_k y(t-kT) \right] y(t-nT) \dots \\ &= -2\epsilon(t)y(t-nT) \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots (2)$$

최적의 계수를 얻기 위한 기울기 알고리즘은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{dc_n(t)}{dt} = -\Delta \frac{d\epsilon^2(t)}{dC_n} \dots\dots\dots (3)$$

따라서, 다음과 같은 조건 식을 통해 최적 계수를 산출할 수 있다.

$$\frac{dc_n(t)}{dt} = 2\Delta\epsilon(\tau)y(t-nT) \dots\dots\dots (4)$$

또는,

$$c_n(t) = c_n(t_0) + \Delta \int_{t_0}^t \epsilon(\tau)y(\tau-nT)d\tau \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{단, } \Delta = \frac{0.2}{(2M+1)y^2(t)}$$

여기서,  $\Delta$ 는 반복적 수행을 위한 step-size에 대한 파라미터이다. 반복 수행기법에서 확실한 수렴을 위해서는  $\Delta$ 의 값으로 작은 크기의 양수 값을 선택하게 되면 기울기 벡터는 영 (zero)으로 수렴하게 된다.]

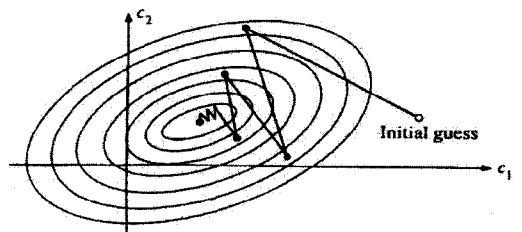


그림 2. 기울기 알고리즘의 수렴 특성 예  
Fig. 2. Example of the Convergence Characteristics of a Gradient Algorithm

#### 3.1 주파수 1-탭 적응 등화기

주파수 선택성 페이딩 환경에서 OFDM 신호의 부 반송파

들은 개별적으로는 주파수 비선택성 영향을 받지만 전체적인 각각의 부 반송파들이 받는 페이딩 특성은 달라지게 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 주파수 영역의 복수 데이터 정보에서 그 부 채널에 해당하는 주파수 영역의 채널 페이딩 계수의 역수를 곱해주게 된다. OFDM 신호에 대해서는 각각의 부 반송파 신호들이 협대역 특성을 가지므로 주파수 영역에서 부 채널별로 TDL (Tapped Delay Line) 구조의 1-탭 등화기를 사용할 수 있다. 그림 3에 OFDM에서의 주파수 1-탭 적응 등화기의 예를 보였다.

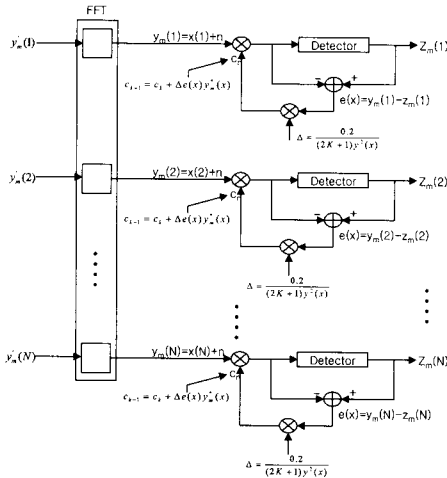


그림 3. 주파수 단일탭 적응 등화기 모델  
Fig. 3. Frequency 1-Tap Adaptive Equalizer

수신신호  $y_m(n)$ 를 복조한 심볼은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(k) = FFT\{y_m(n)\}e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{n=0}^{N-1} y_m(n)e^{-j2\pi kn/N} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, m은 심볼의 인덱스, n은 시간영역 샘플 신호의 인덱스, k는 주파수 영역에서의 부 반송파의 인덱스를 나타낸다. 식 (6)은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(k) = X_m(k)H_m(k) + D_m(k) \dots \dots \dots (7)$$

이때,  $H_m(k)$ 는 채널의 주파수 응답이고  $D_m(k)$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다. 등화기 출력을  $\widetilde{X}_m(k)$ 라고 할 때 등화기의 추정오차를 다음과 같이 나타내면,

$$\epsilon_m(k) = X_m(k) - \widetilde{X}_m(k) \dots \dots \dots (8)$$

제곱평균을 최소화 하는 등화기의 계수는 식 (9)와 같은 반복 알고리즘으로 구할 수 있다.

$$C_{m+1}(k) = C_m(k) + \mu\epsilon_m(k)Y_m^*(k) \dots \dots \dots (9)$$

### 3.2 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기

OFDM 시스템의 특징으로 채용할 수 있는 등화기의 형태는 주파수 등화기와 Pre-FFT 등화기 2가지의 형태를 갖을 수 있다. 각각의 등화기의 장점과 단점은 시뮬레이션 결과를 통해 알아 본다. 본 절에서는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 알아 본다. 그림 4에서 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기의 구조를 나타내고 있다. 그림 4를 통해서 알 수 있듯이 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기는 주파수 단일 탭 적응 등화기와 비교해서 수신단에 IFFT 블록 하나가 더 추가된 복잡한 구조를 나타내고 있다. Pre-FFT 11-탭 적응 등화기의 등화기 계수는 주파수 단일 탭의 등화기 계수와 동일한 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다[12].

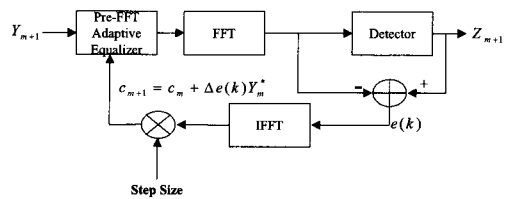


그림 4. Pre-FFT 11탭 적응 등화기 모델  
Fig. 4. Pre-FFT 11-Tap Adaptive Equalizer

### 3.3 Dual 적응 등화기

Dual 적응 등화기는 수신단의 FFT 블록을 기준으로 앞과 뒤에 각각 Pre-FFT 11-탭 적응형 등화기와 주파수 1-탭 적응형 등화기를 두어 두 번의 등화를 행하는 형태이다. Dual 적응 등화기는 두 번의 등화를 행하므로 다른 형태의 등화기에 비해 높은 보상 기법을 갖을 것이다. 그러나 두 개의 등화

기를 병행하여 적용함으로써 시스템의 복잡도는 증가할 것이다.

그림 5 에서 Dual 적응 등화기를 나타내고 있다.

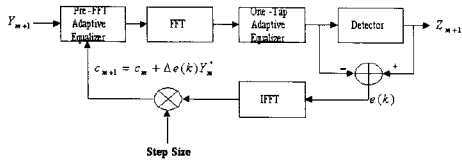


그림 5. Dual-type 적응 등화기 모델  
Fig. 5. Dual Adaptive Equalizer

#### IV. Rummler 채널 모델

##### 4.1 Rummler 채널 모델

디지털 마이크로파 전송 링크에는 송·수신안테나 사이에 직접경로가 존재한다. 대부분의 대기상태에서 직접파만이 존재하는 마이크로파 전송 시스템의 경우 에러율은  $10^{-10}$  정도의 낮은 값을 갖지만, 어떠한 대기 조건에서는 대기층에 반사되어 수신되는 지연파가 존재하여 다중경로 전파가 발생하므로 오율이 높아지는 경우가 있다. 이러한 마이크로파 대역의 채널에 대해서는 Rummler가 만들어낸 Three-path 채널모델이 주로 사용되고 있다.

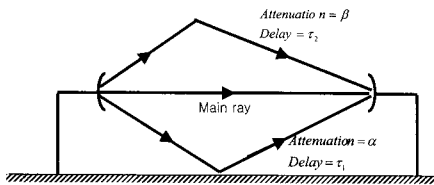


그림 6. Rummler의 Three-path 채널 모델  
Fig. 6. Rummler's Three-path channel Model

Rummler의 Three-path 채널모델에 대한 임펄스 응답은 다음과 같이 주어진다[13, 14, 15].

$$h(t) = \delta(t) + \alpha\delta(t - \tau_1) + \beta\delta(t - \tau_2) \dots\dots\dots (10)$$

이때,  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 는 직접파에 대한 각각의 다중경로에 대해 관계된 시간 지연이다.

채널의 주파수 응답함수는 식 (11)과 같다.

$$H(w) = 1 + \alpha e^{-jw\tau_1} + \beta e^{-jw\tau_2} \dots\dots\dots (11)$$

Rummler 모델에서  $\tau_1 \ll B$ 이란 조건을 만족하여야 하므로  $e^{-jw\tau_1} \approx 1$ 이 되어 위의 식은 다음과 같이 간략화된다.

$$H(w) = 1 + \alpha + \beta e^{-jw\tau} \dots\dots\dots (12)$$

위의 식은 결국 Two-path 모델과 같은 형태이므로 notch의 위치가  $w_0$ 이면, 다음과 같이 채널의 주파수 응답을 표현할 수 있다.

$$H(w) = a[1 - b e^{-j(w - w_0)\tau}] \dots\dots\dots (13)$$

이때,  $a = 1 + \alpha$ 이고  $b = -\beta / (1 + \alpha)$ 이다.

식 (13)을 이용해 전력 스펙트럼을 구하면 다음과 같다.

$$|H(w)|^2 = a^2 [1 + b^2 - 2b \cos[(w - w_0)\tau]] \dots\dots\dots (14)$$

식 (14)를 dB 단위로 다시 표현하면 다음 식과 같이 주어진다.

$$A(f) = 10 \log_{10} |H(f)|^2 \dots\dots\dots (15)$$

실험적으로 증명된  $\tau$ 값은  $\tau \approx 1 / (6B)$ 의 수식적 관계를 가지고 있다는 것이 알려져 있다. 예를 들어서 대역폭  $B$ 가 10MHz인 경우  $\tau$ 는 16(nsec) 정도의 값을 갖게 된다.

본 논문에서는  $a$ 에 대한 값을 1로 정규화 시키고 지연시간  $\tau$ 는 16(nsec)인 경우에 대해 지연신호의 진폭  $b$ 와 notch 주파수가 변화하는 정규화된 Two-path 채널을 모델링하여 사용한다.

그림 7 은 본 논문에서 적용하는 Two-path 채널에 대한 전력스펙트럼 밀도를 notch 주파수와 반사파의 감쇠 계수에 따라 나타내었다.

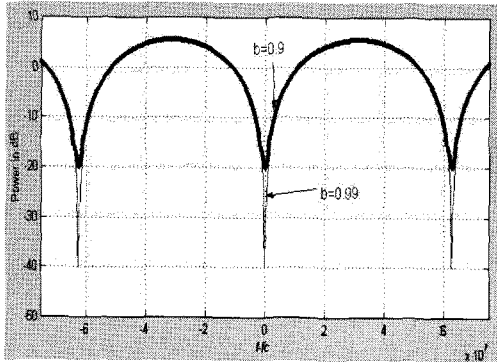


그림 7. Two-path 채널 모델의 진폭응답 (notch 주파수 간격 62.5(MHz))  
 Fig. 7. Amplitude Response of Two-path Channel Model  
 (Interval of Notch Frequency : 62.5(MHz))

그림 8은 디지털 필터를 거친 송신 신호가 본 논문에서 적용하는 Two-path 채널의 통과 후에 전력 스펙트럼 밀도를 나타내고 있다. 여기서 반사파의 감쇠 계수  $b$  는 0.9로 고정 하였으며, notch 주파수는 송신된 신호의 대역의 가운데에 놓인 최악의 경우이다.

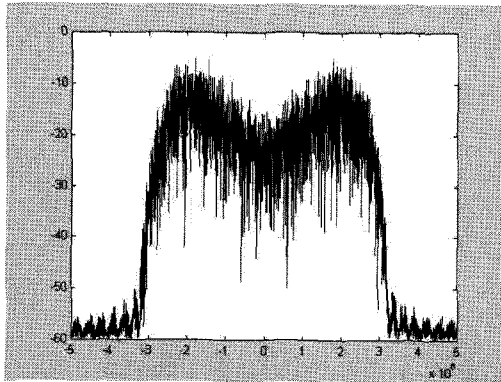


그림 8. Two-path 채널 모델의 진폭응답 (감쇠 계수  $b = 0.9$ )  
 Fig. 8. Amplitude Response of Two-path Channel Model (Attenuation Coefficient : 0.9)

#### 4.2 시뮬레이션

본 절에서 고려되어 지는 채널은 Rumlmer의 마이크로파 대역의 채널 모델링을 적용하였으며, 적용된 시스템의 대역폭은 10 MHz, 부 반송파 수는 16이고 페이딩 감쇠계수는 0.9인 열악한 환경을 설정한다. 그림 9 ~ 그림 10에서는 마이크로파 대역의 Two-path 채널 환경에서 세가지 형태의 적응형

등화기를 적용한 OFDM 시스템의 성좌도와 성능 곡선을 나타내고, 그 결과를 비교 및 검토하고자 한다.

그림 9는 마이크로파 대역의 Two-path 채널에서  $E_s/N_0$ 가 30 dB인 경우에서 성좌도를 나타낸 것이다. 각각의 그림의 첫 번째 성좌도는 notch 주파수에 있는 성좌도이며 두 번째, 세 번째, 네 번째 성좌도는 notch 주파수에서 일정 간격만큼씩 멀어짐에 따라 나타낸 성좌도이다. 주파수 1-탭 적응 등화기의 특징은 그림 9-(c)에서 확인할 수 있듯이 신호의 퍼짐정도가 높지만 진폭왜곡은 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기에 비해 높게 등화 된다. 이에 비해 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기는 그림 9-(d)에서 확인할 수 있듯이 신호의 퍼짐정도는 낮지만, 진폭 왜곡은 주파수 1-tap 등화기에 비해 낮게 등화 된다. 그림 9-(e)에서는 주파수 등화와 Pre-FFT 등화기의 특징이 결합된 dual 적응 등화기의 성좌도를 나타내고 있다.

그림 10은 Two-path 다중 경로 채널 환경에서 주파수 1-탭 적응 등화기와 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 적용한 경우 오율 성능을 나타내고 있다. 성능 분석 결과 주파수 1-탭 적응 등화기는 18 dB 이하의 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기에 비해서 높은 성능 개선 능력을 가지고 있으나 18 dB 이상의 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기가 높은 성능 개선이 이루어진다. 왜냐하면, 본 논문에서 제안하는 등화기는 Blind 등화기이므로 Detector 후단의 신호와 수신된 신호와 차의 값으로 등화기 계수를 결정하게 된다. 만약  $E_s/N_0$ 가 낮은 경우에는 Detector 후단의 신호가 잘못된 심볼로 결정되어 Decision 에러가 발생하게 된다. 그러므로 등화기 계수는 잘못된 결과를 만들어 에러가 발생할 수 있다. 주파수 1-탭 적응 등화기는 부 반송파 마다 각각의 등화기 계수 업데이트가 이루어지게 된다. 만약 Decision 에러가 발생하게 되어 맞지 않는 계수 업데이트가 이루어지면, Decision 에러가 발생한 부 반송파 만이 에러가 발생한다. 그렇지만 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기는 Decision 에러가 발생하게 된다면 부 반송파 모두가 에러가 발생할 수도 있으므로 비교적 낮은 dB에서는 주파수 적응 등화기가 Pre-FFT 11-탭 등화기에 비해 크게 성능을 개선시킨다.

그림 11은 본 논문에서 제안하는 개선된 등화기 구조를 갖는 병행 적응 등화기를 적용한 경우 Pre-FFT 11-tap 등화기와 주파수 1-tap 등화기에 비해 보다 높은 성능 개선 능력을 가짐을 나타내고 있다.

감쇠 계수가 0.9인 Two-path 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 OFDM 시스템에 병행 적응 등화기를 채용하면,  $E_s/N_0$ 가 18 dB에서 데이터 통신이 가능한  $SER = 10^{-5}$ 을 달성한다.

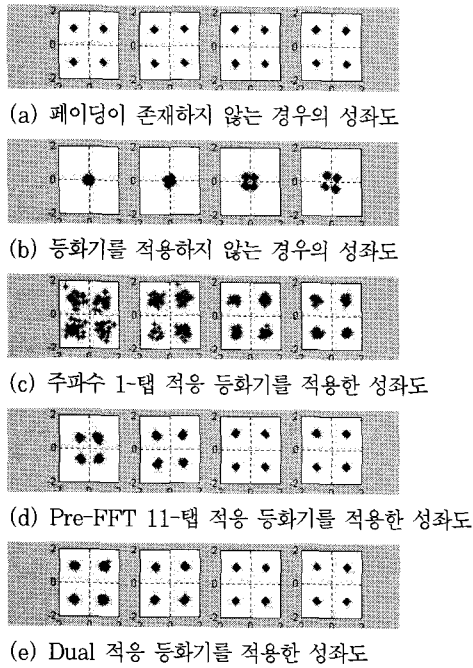


그림 9. Two-path 채널 환경에서 등화기 도입에 따른 OFDM 시스템 성좌도

Fig. 9. Constellation of OFDM System with Adaptive Equalizer under Two-path Channel Environment)

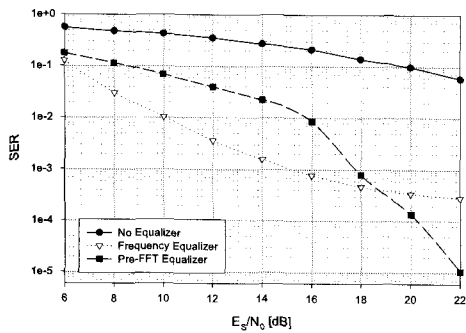


그림 10. Two-path 채널 환경에서 주파수 1-탭 적응 등화기와 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템 성능 분석 Fig. 10. Performance Analysis of OFDM with Frequency 1-Tap Adaptive Equalizer and Pre-FFT 11-Tap Adaptive Equalizer under Tow-path Channel Environment

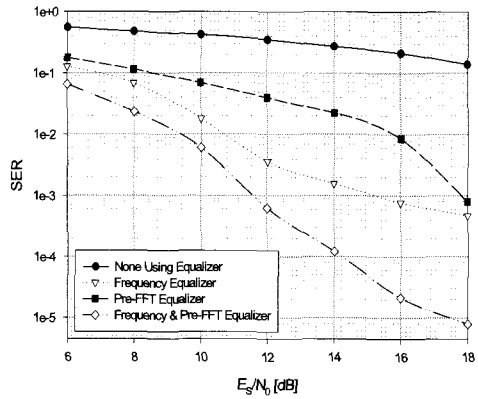


그림 11. Tow-path 채널 환경에서 세가지 형태의 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템 성능 분석 Fig. 11. Performance Analysis of OFDM with Three-types Adaptive Equalizer under Tow-path Channel Environment

## V. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 대역의 Two-path 채널 환경하에서 적응 등화기를 적용한 OFDM 시스템을 분석하였다. 마이크로파 대역의 Two-path 채널은 Rummier 채널 모델링을 통해 시뮬레이션 하였다. 또한 성능 개선 기법을 위한 적응 등화기는 OFDM 시스템에서 적용될 수 있는 주파수 1-탭 적응 등화기와 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기 그리고 두 등화기를 병행하여 사용하는 Dual 적응 등화기 세 가지 적응 등화기를 사용하였다.

마이크로파대의 Rummier의 Two-path 채널 환경하에서 시스템 성능 분석 결과, 주파수 1-탭 적응 등화기를 적용한 경우에는  $E_s/N_0$ 가 18 dB 이내인 심볼 에너지대 잡음 전력비인 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기에 비해 높은 성능 향상을 확인할 수 있으며, 반면에 심볼 에너지 대 잡음 전력비  $E_s/N_0$ 가 18 dB 이상인 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 적용한 시스템이 주파수 1-탭 적응 등화기를 적용한 시스템에 비해 높은 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있다.

수신단 성능 개선 기법으로 주파수 1-탭 적응 등화기와 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 병행하여 적용한 Dual 적응 등화기를 적용한 시스템은 채널 환경이 열악한 경우에 각각의

적용 등화기를 적용한 시스템에 비해 높은 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

향후 연구 방향으로는 더 개선된 적응 등화기를 연구하여 기존 시스템에 비해 높은 성능을 향상시키도록 하겠음.

### 참고문헌

[1] O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, D. Landstrom and F. Sjoberg, "An introduction to orthogonal frequency-division multiplexing," Research Report TULEA 1996, Division of Signal Processing, Lulea University of Technology, 1996.

[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] 이관형, 이명호, "나카카미-m 페이딩 채널에서 최대비합성과 동이득합성에 관한 연구," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제 11권, 제 5호, 195-201쪽, 2006년 11월

[4] 이관형, 이명호, "다중경로 페이딩 채널에서 멀티캐리어 코드분할다중접속 시스템 성능 분석," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제 11권, 제 3호, 271-279쪽, 2006년 7월

[5] 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.

[6] Blahut, R. E., "Fast Algorithms for Digital Signal Processing," Addison-Wesley, 1985.

[7] 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.

[8] Pommier D., and Wu Yi, "Interleaving or spectrum-spreading in digital radio intended for vehicles," EBU Review-Technical Vol. 217, pp. 128-142, June 1986.

[9] 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.

[10] N. Kataoka, R. Kohno : "Adaptive equalizer for multi-carrier communication system," Technical Report of IEICE, SST 97-74, pp.1-6, Dec. 1997. (in Japanese)

[11] Jeruchim, Michel C., Philip Balaban, and K. Sam Shanmugan, "Simulation of Communication Systems, New York," Plenum Press, 1992.

[12] S. Armour, A. Nix and D. Bull, "Performance analysis of a pre-FFT equaliser design for DVB-T," IEEE Transactions on Consumer Electronics, August 1999.

[13] W. D. Rumlmer, "A new selective fading model: application to propagation data," Bell System Technical J., No. 5, pp. 1037-1071. May-June 1979.

[14] W. D. Rumlmer, "More on the multipath fading channel model," IEEE Trans. Communications, Com-29, No. 3, pp. 346-352, Mar. 1981.

[15] W. D. Rumlmer et. al., "Multipath fading channel models for microwave digital radio," IEEE Communication Magazine, 24, No. 11, pp. 30-42, Nov. 1986.

본 논문은 동양공업전문대학의 학술연구과제를 통해 연구되었음을 알립니다.

### 저자소개



#### 김장욱

1990: 한국과학기술원  
전기 및 전자공학과 공학사

1999: 고려대학교  
정보통신공학과 공학석사

2004: 한국항공대학교  
정보통신공학과 공학박사

현재: 동양공업전문대학  
전기전자통신공학부 부교수

관심분야: 이동통신시스템, OFDM, 차세대 이동통신시스템.