

비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 OFDM/QPSK 시스템의 성능 개선

## 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 OFDM/QPSK 시스템의 성능 개선

유 기 희, 꺾 재 민, \*박 기 식, \*\*안 준 배, \*\*\*조 성 언, 조 성 준

한국항공대학교 항공통신정보공학과  
\* 인하공업전문대학 정보통신과  
\*\* (주) 아미텔  
\*\*\* 순천대학교 정보통신공학과  
전화 : 02-3158-1518 / 팩스 : 02-3158-1935

### Performance Improvement of an OFDM/QPSK System in Selective Fading and Frequency Offset Channel

Ki Hee Ryu, Jae Min Kwak, \*Ki Sik Park, \*\*Jun Bae Ahn, \*\*\*Sung Eon Cho, Sung Joon Cho

Dept. of Telecomm. & Inform. Eng., Hankuk Aviation Univ.  
\* Dept. of Computer & Comm. Eng., Suncheon Univ.  
\*\* ARMITEL Co., Ltd  
\*\*\* Dept. of Computer & Comm. Eng., Suncheon Univ

#### Abstract

In this paper, We have investigated the SER performance of a OFDM/QPSK system with carrier-frequency offset in a frequency non-selective fading channel. Adaptive linear equalizer is adopted to OFDM/QPSK systems for compensation of performance degradation according to the non-selective fading and carrier frequency offset.

As a result of performance analysis, the more frequency offset is, the worse performance of OFDM/QPSK system is. However, when OFDM/QPSK system adopts the adaptive linear equalizer, the SER performance is enhanced to the limit range

#### I. 서 론

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<sup>[1]</sup>.

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 (Intersymbol Interference)의 영향을 완전히 제거 할 수 있다는 장점이 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 OFDM 시스템은 부 반송파의 협대역화로 인해 작은 주파수 오프셋 (Offset)에 대해서도 SER (Symbol Error Rate) 성능 열화가 증가하는 단점이 있다<sup>[3]-[5]</sup>.

본 논문에서는 먼저 주파수 비선택성 채널 환경을 시뮬레이션하고 반송파 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서의 OFDM/QPSK 시스템에 대한 성능을 분석한다. 그리고 수신단의 성능 개선을 위해 LMS 기법을 적용한 단일 탭 적응 선형 등화기 (Adaptive Linear Equalizer) 기법을 OFDM/QPSK 시스템에 적용하여 성능 개선 정도를 평가하고자 한다.

#### II. 시스템 채널 모델

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 모델을 그림 1에 나타

내었으며 다음의 내용에서 설명한다.

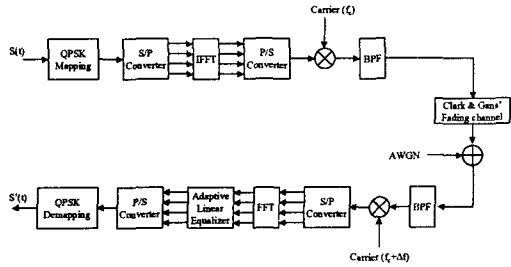


그림 1. 시뮬레이션 모델

### 2.1. 주파수 비선택성 채널 모델

본 논문에서 제안된 주파수 비선택성 채널모델은 Clarke의 페이딩 모델에 Gans가 도입한 방법대로 도플러 스펙트럼을 적용해 채널을 구현하고, 시뮬레이션을 통해 검증된 결과를 차후의 성능분석 시뮬레이션에 적용할 것이다<sup>[6]</sup>.

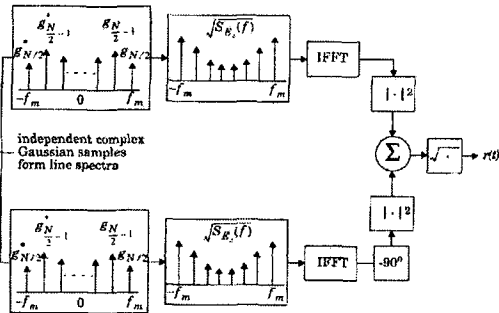


그림 2. 레일리 페이딩 시뮬레이터 모델

레일리 페이딩 시뮬레이터는 다음과 같이 구성된다.

먼저 주파수 축에서 N개의 복소 가우시안 샘플 값을 생성한다. 생성된 샘플은 도플러 전력 스펙트럼  $S_{Dx}(f)$  필터를 통과한 후 신호는 시간축으로 변환된다. 변환된 신호는 각각 직교축과 동상축으로 나누어 페이딩 포락치를 계산한다.

### 2.2. 주파수 오프셋

OFDM 시스템은 다중경로 페이딩에 강할 뿐 아니라 부반송파 간의 스펙트럼 중첩을 허용하므로 대역 효율을 극대화시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 송·수신단 간의 국부 반송파에 대한 발진기 오차 또는 도플러 천이를 발생시키는 무선 채널에서 발생하는 주파수 오프셋 등이 존재

하는 경우, 다수의 부 반송파를 좁은 간격으로 배치하여 전송하는 OFDM 신호는 단일 반송파 신호에 비해 오히려 복조시 심각한 성능 저하를 유발시키게 된다.

본 논문에서는 OFDM 시스템에 부과되는 주파수 오프셋을 SFO (Subcarrier Frequency Offset) 응답함수를 정의하여 시스템 성능을 분석한다.

SFO 응답은 주파수 오프셋이 존재하는 경우 기준 부 반송파를 통해 전송한 주파수 영역의 단위 임펄스 신호가 기준 부 반송파 이외의 다른 부 반송파에 대한 복조 과정에 간섭을 일으켜 발생하는 ICI 레벨에 대해 주파수 응답으로서 나타낸 것이다. 우선 SFO 응답 함수를 얻기 위해서 전송되는 주파수 영역의 k번째 부 반송파 신호를 Kronecker-Delta 함수로 가정한다.

$$a_k = \delta(k), \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

송신부의 부 반송파 변조를 위해  $a_k$ 에 대해 IFFT 과정을 거치고 나면  $x(n)$ 이 구해진다. 여기서, n은 OFDM 심볼의 시간 영역 샘플 인덱스이다.

주파수 오프셋에 의해 OFDM 시스템에서 발생하는 ICI 매커니즘을 분석하기 위해서 먼저 채널의 잡음은 고려하지 않은 상태에서 해석해 본다. 부 반송파 사이의 간격에 대한 주파수 오프셋의 비인 정규화된 주파수 오프셋의 값을  $\epsilon$ 라 하고 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon = \frac{f_{Dx}}{\Delta f} \quad (2)$$

여기서,  $f_{Dx}$ : OFDM 송수신 반송파간의 주파수 오프셋

$\Delta f$ : 인접한 부 반송파 사이의 주파수 간격

그러므로, 주파수 오프셋( $\epsilon$ )이 존재할 경우에 수신된 OFDM 신호에 대한 시간영역의 샘플은 다음과 같이 표현되어진다.

$$y(n) = \exp\left(j\frac{2\pi}{N}\epsilon n\right) \quad (3)$$

여기서,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 이다.

수신단에서 FFT 처리과정을 거친 OFDM 신호에 대한 각각의 부 반송파 신호  $Y(k)$ 는 주파수 오프셋  $\epsilon$ 을 가지는 Kronecker-Delta 함수로 표현되는데, 이것을 주파수 오프셋 응답 (SFO response)이라 한다. 그러므로, DFT 처리과정을 지난 SFO 응답  $S(k)$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}(k-\epsilon)n\right) \quad (4)$$

### 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 OFDM/QPSK 시스템의 성능 개선

식 (4)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(k) = \frac{\sin(-\pi\epsilon)}{N e^{-j\pi\epsilon}} \cdot \left[ \cot\left(\frac{\pi}{N}(k-\epsilon)\right) + j \right] \quad (5)$$

정규화된 주파수 오프셋,  $\epsilon=0$  인 경우는 주파수 오프셋이 존재하지 않는 이상적인 경우를 나타내며 SFO 응답은  $S(k)=\delta(k)$ 로 간단히 표현할 수 있고, 이 경우에는 ICI가 발생하지 않는다.

반면에, 주파수 오프셋이 존재하는 경우,  $\epsilon \neq 0$  인 경우에는 수신신호의 부 반송파 인덱스  $k \neq 0$ 인 경우에 ICI 성분이 발생하며 정규화된 주파수 오프셋  $\epsilon$ 의 증가에 따라 ICI의 레벨도 비례하여 증가한다. 실제의 OFDM 시스템의 경우에는 기준 부 반송파 신호에 발생되는 ICI는 다른 부 반송파 신호들의 SFO 응답 함수값들에 대한 합으로 나타나게 된다. 그러므로 시스템의 성능 향상을 위해 ICI 레벨을 감소시킬 수 있는 방법이 제안되어야 한다.

### III. 수신기 성능 개선 기법

본 논문에서는 앞서 제시된 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 환경에서의 시스템 성능 개선 방법으로 적응 LMS 등화기를 채택함으로써 얻게 되는 성능 개선 정도를 정량적으로 구해낸다.

그림 3에는 단일 탭 등화기를 적용한 OFDM 시스템을 나타내고 있다.

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

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

여기서,  $m$ 은 심볼의 인덱스,  $n$ 은 시간영역 샘플 신호의 인덱스,  $k$ 는 주파수 영역에서의 부 반송파의 인덱스를 나타낸다. 식 (6)은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$\epsilon_m(k) = X_m(k) - \hat{X}_m(k) \quad (8)$$

제곱평균을 최소로 하는 등화기의 계수는 식 (9)과 같은 반복 알고리즘으로 구할 수 있다.

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

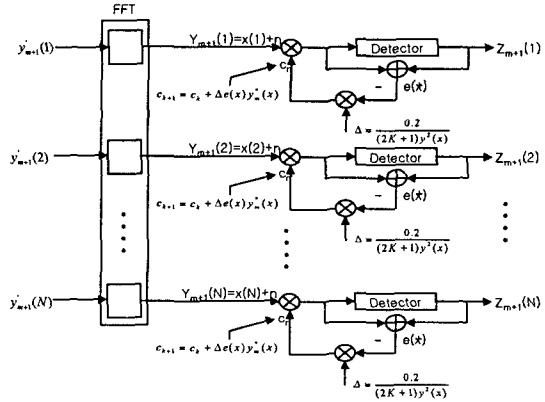


그림 3. OFDM 시스템에 적용한 단일 탭 선형 등화기 모델

### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 주파수 비선택성 페이딩 채널과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널환경에서 시스템 분석 및 성능 개선 기법을 사용한 시스템을 분석하였다. 비선택성 페이딩 시뮬레이션은  $f_d \times T = 0.05$ 로 하였다. 만약 HIPERLAN/2 규격에 맞추어서 5MHz의 주파수 대역을 사용하는 경우 100km/h의 속도로 움직이는 이동체에서는 약 500Hz의 최대 도플러 쉬프트 주파수가 발생되게 된다. 이때 시스템이 1.2Mbps의 전송속도를 가지게 되면  $f_d \times T = 0.05$ 의 조건을 만족하게 된다.

그림 4는 주파수 비선택성 페이딩 채널 환경에서 OFDM/QPSK 시스템의 SER 성능을 나타내고 있다. 여기서 비선택성 페이딩 채널은 Clark & Gans 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 이용하였으며 수신단에서는 페이딩에 의한 위상의 변동은 PLL 또는 파일럿 신호를 이용하여 완전히 제거되었다는 가정하에 시뮬레이션 하였다. 수신 성능 향상을 위한 적응 선형 등화기 step size는 0.01이며 시뮬레이션 수행 과정에서 페이딩 진폭의 변동이 급격하게 변화하는 경우에는 충분한 수렴상태를 가지지 못하게 되나 완만하게 변동하는 부분에서는 수렴상태를 유지할 수 있게 된다. 비선택성 페이딩 채널 환경에서 적응 등화기를 사용하면 SER  $10^{-4}$ 을 기준으로 하여 약 0.5dB정도의 작은 성능 향상이 된다.

그림 5는 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 OFDM/QPSK 시스템의 SER 성능을 나타내고 있다. 주파수 오프셋이 증가함에 따라 인접한 부반송파로부터 간섭의 정도가 증가하게 되어 시스템 성능이 급격히 열화됨을 확인할 수 있다. SER =  $10^{-2}$ 을 기준으로 하여 오프셋이 증가됨에 따라 각각 약 1dB, 3dB, 7dB 정도로 성능 열화가 증가된다.

그림 6은 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 적응형 등화기를 적용한 OFDM/QPSK 시스템의 SER 성능을 나타냈다. 성능 분석 결과 비선택성 페이딩과 0.014이하의 주파수 오프셋의 영향을 받은 성능 곡선들은 적응형 등화기를 사용하여 거의 동일한 성능을 얻을 수 있도록 향상된다.

V. 결론

본 논문에서는 반송파 주파수 오프셋이 존재하는 이동통신 환경에서 OFDM/QPSK 시스템의 성능 열화를 평가하였다. 성능개선 방법으로는 간단한 단일 탭 적응 선형 등화기를 사용한다면, 비선택 페이딩 성능개선 정도는 작지만, 주파수 오프셋의 성능개선 정도는 한정된 범위 내에서 진폭과 위상편이를 보상해 주므로 높은 성능 향상이 이루어진다.

위의 결과를 기반으로 하여 적절한 부호화 기법과 성능 향상 기법을 사용하여 이동통신상에서 높은 전송을 보장할 수 있는 시스템을 설계할 수 있다.

참고 문헌

- [1] O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, D. Landstrom and F. Sjöberg, "An introduction to orthogonal frequency-division multiplexing," *Research Report TULEA 1996, Division of Signal Processing, Lulea University of Technology*, 1996.
- [2] 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.
- [3] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 100-109, Feb. 1995.
- [4] William D. Warner and Cyril Leung, "OFDM/FM frame synchronization for mobile radio data communication," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, pp. 302-313, vol. 42, no. 3, August 1993.
- [5] T. M. Schmidl and D.C. Cox, "Blind synchronization

for OFDM," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 2, pp. 113-114, Jan. 1997.

- [6] T. S. Rappaport, *Wireless Communications principle and practice*, Prentice-Hall, 1996.

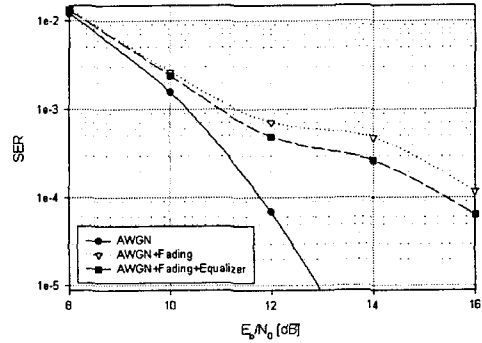


그림 4. 주파수 비선택성 페이딩 채널 환경에서 OFDM/QPSK 시스템 성능 분석

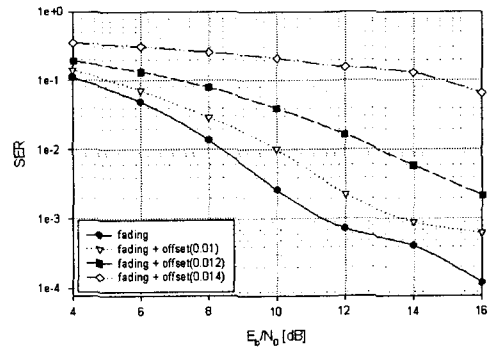


그림 5. 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 OFDM/QPSK 시스템 성능 분석

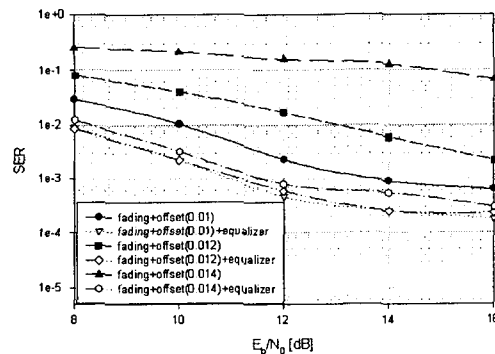


그림 6. 주파수 비선택성 페이딩과 주파수 오프셋이 함께 존재하는 채널에서 적응형 등화기를 적용한 OFDM/QPSK 시스템 성능 분석